

ARCHEOLOGIA DEL FERRO

Sistemi materiali e processi
dalle origini alla Rivoluzione Industriale

Marco Cima



Edizioni Nautilus Torino

A mia madre

In copertina: fucina e affineria di Bellefontaine - Le Blanc (Francia) in un acquarello dei primi dell'Ottocento.

Archeologia del Ferro

Sistemi materiali e processi
dalle origini alla Rivoluzione Industriale

Marco Cima

Questo manuale, edito nel 1991, dopo due edizioni è stato aggiornato e rivisto nel 2023/24 nell'ambito di un progetto editoriale del **Museo Archeologico del Canavese** e viene proposto agli utenti online in forma gratuita.



EDIZIONI NAUTILUS
TORINO

RINGRAZIAMENTI

Nell'impossibilità di ringraziare tutti coloro che hanno portato contributi al presente lavoro, mi limito a ricordare quelle persone che mi hanno supportato in maniera determinante. Anzitutto Liliana Mercado, soprintendente per i Beni Archeologici del Piemonte, che ha più volte valorizzato il mio lavoro e ha favorito le attività di ricerca dalle quali ho tratto molte informazioni, così come Riccardo Francovich, docente di Archeologia Medievale nell'Università di Siena, che mi ha fornito preziosi consigli sull'impostazione generale del libro. Entrambi sono scomparsi ma restano nelle opere e nel ricordo. Un ringraziamento particolare va a Giuseppe Fragiaco, già direttore della Biblioteca Civica di Ivrea, che ha messo a mia disposizione i risultati di una ricerca bibliografica decennale.

Prima edizione 1991

Seconda edizione 1996

Terza edizione essenzialmente digitale con revisione completa dei testi elaborata nell'ambito delle attività del Museo Archeologico del Canavese - Maggio 2024

Presentazione

Sono trascorsi oltre trent'anni dalla pubblicazione del fortunato volume dedicato all'Archeologia del ferro, coraggioso quanto inusuale sforzo - già peraltro rilevato da Riccardo Francovich nella Presentazione del 1991 - di affrontare una tematica complessa, che solo da poco tempo aveva ridestato l'interesse degli archeologi italiani, e di estenderla lungo un amplissimo arco cronologico ("Dalle origini alla Rivoluzione Industriale" recita infatti il sottotitolo), con uno sguardo sull'intera area mediterranea. Oggi Marco Cima ripropone il suo lavoro, con minime modifiche nella scansione del Sommario, ma con numerosi aggiornamenti bibliografici e riferimenti puntuali a nuovi contesti di scavo.

Le motivazioni alla base della riedizione del volume sono molteplici: il formato solo digitale curato dal Museo Archeologico del Canavese, che nel tempo ha puntato molto sull'attività didattica ad ampio raggio, rendendo accessibile lo studio a un pubblico non di soli specialisti; il taglio volutamente manualistico, che mantiene intatto il valore della pubblicazione in un panorama intanto arricchitosi di altri importanti contributi, da quelli ormai "storici" nel campo dell'archeologia medievale, ma non solo, per cui è d'obbligo il riferimento a R. Francovich e T. Mannoni, sino a quelli più recenti di E. Giannichedda, V. La Salvia e altri. Da ultimo l'attualità di un'impostazione, diffusasi solo recentemente ma inconsueta nei primi anni Novanta del secolo scorso, che prende avvio dall'esame del processo produttivo, studiato non a partire dal manufatto e quindi dalla prospettiva del consumo, bensì dal giacimento di provenienza.

In assenza di ampi lavori di sintesi, non è casuale che Archeologia del Ferro sia ancora oggi costantemente citato nelle bibliografie archeologiche, sia in quelle "essenziali" del Dizionario di Archeologia (2000) curato da R. Francovich e D. Manacorda, sia in contributi puntuali, ed è quindi comprensibile che l'Autore, avendo negli anni continuato ad occuparsi attivamente di ricerche e approfondimenti nel campo dell'intero ciclo del ferro, si senta ora in dovere di rendere conto di nuovi dati e di fornire ulteriori precisazioni su quanto già illustrato, che viene riesaminato tenendo conto di nuovi apporti scientifici e/o di analisi archeometriche. Il volume si sofferma in particolare su alcuni contesti del territorio subalpino (Scarmagno, Strambinello, Ceresole Reale), riproponendo sinteticamente per il castrum altomedievale di Belmonte i risultati degli studi preparatori per la recente (2019) mostra promossa dal Museo Archeologico del Canavese, con il riesame della fucina di età longobarda e dei numerosi utensili in ferro, che ha restituito

correttamente sia gli aspetti tecnici della produzione metallurgica, sia l'ambiente e la realtà sociale nel quale detta fucina si inseriva.

Al già ricco apparato illustrativo del volume originario, la nuova edizione aggiunge documentazione grafica e fotografica, oltre a riferimenti a fonti d'archivio, nella convinzione - oggi come allora - che solo l'ampiezza dello sguardo a comprendere fonti diverse sia di aiuto a restituire la complessità dell'archeologia della produzione, caratterizzata dalla lunga durata delle tecniche e quindi da difficoltà nelle datazioni puntuali.

Molto opportunamente viene allora ampliato il capitolo delle Conclusioni, inserendo una sorta di vademecum utile all'archeologo in fase di scavo, per aiutarlo nel non semplice riconoscimento delle diverse tipologie di scorie ferrose e nella corretta attribuzione a specifici momenti del ciclo produttivo.

Vorrei infine evidenziare il significato del volume quale testimonianza di resti materiali che troppo rapidamente vanno scomparendo, con l'auspicio che le politiche di tutela ai diversi livelli, con il coinvolgimento delle comunità locali, ne vengano stimolate e possano intraprendere azioni programmate di conservazione e valorizzazione.

*Egle Micheletto
(già soprintendente per l'Archeologia del Piemonte)
Maggio 2024*

Presentazione

L'attitudine, tutta italiana, di evitare le sintesi storiche al fine di non cascare nella "trappola" di un lavoro che rischia di essere non esaustivo e approssimato è stata coraggiosamente superata da Marco Cima in questa ricostruzione dei sistemi materiali e dei processi produttivi del ferro dalle origini alla Rivoluzione Industriale.

Il quadro di riferimento complessivo del volume è infatti quello europeo - anche se, per la prima volta, i dispersi indizi di una storia della produzione del ferro in Italia vengono organicamente presentati - e a scala diacronica presa in esame è tale da far pensare ad una storia delle tecniche estrattive e siderurgiche avulse dai contesti sociali. Viceversa il pericolo di una lettura "evolutiva" delle tecnologie è stato largamente evitato: il ricorso sistematico alle fonti archeologiche e alle fonti scritte ha contribuito in modo determinante a cogliere i dettagli delle trasformazioni tipologiche delle strutture dei forni e delle diverse tecniche e le sovrapposizioni cronologiche in contesti sociali differenziati.

Il contributo di Cima ha il merito di giungere, nella sua narrazione, fino alla produzione indiretta del ferro che viene organicamente trattata inoltrandosi nel XVIII secolo offrendo agli storici e soprattutto agli archeologi, uno strumento essenziale attraverso il quale collocare i diversi processi di produzione che stanno a monte e a valle di ogni singola fase di lavorazione, presentando la complessità delle interrelazioni fra territorio e fucina.

La ricostruzione complessiva è presentata in una sistematica articolazione per soggetto e quindi in grado di dotare un non specialista degli strumenti necessari per farsi un quadro estremamente chiaro della dinamica storica dei processi di produzione e per gli studiosi di interpretare o reinterpretare le fonti materiali o le fonti scritte su cui si trovano a lavorare.

La pubblicazione del volume si colloca inoltre in una fase di rinnovato interesse della storiografia verso i temi della storia delle tecnologie e in un momento di ripresa degli studi archeologici sui temi della produzione. Questa è un'area dove la tradizione italiana si trova complessivamente in notevole svantaggio rispetto al quadro di riferimento europeo, basti pensare alla recente letteratura storica francese e viceversa allo scarso numero di centri di produzione ceramica o vetraria di epoca preindustriale fino ad ora indagati nel nostro paese, per non dire del sostanziale silenzio riscontrato fino agli ultimi cinque anni intorno ai temi delle attività estrattive e metallurgiche.

Il volume sull'archeologia del ferro costituisce, a mio avviso, un importante contributo, che non soltanto ci offre una sintesi aggiornata di quanto fino ad ora è stato elaborato intorno al tema, ma soprattutto ci permette di valutare correttamente e di evidenziare il valore delle testimonianze materiali di cui il nostro territorio è ricco: penso in particolare al costante interesse rivolto sempre più frequentemente verso i problemi dell'archeologia industriale e alla progettazione dei parchi archeo-minerari e metallurgici, di cui troppe volte si pigliano in considerazione soltanto le monumentali fasi della Rivoluzione Industriale, ignorando le fasi produttive meno recenti e l'intero ecosistema costituito dai complessi minerari - ancor oggi esistenti, ma spesso minacciati da cave di materiali o distrutti da selvagge discariche - e dall'economia del bosco.

Una storia delle tecniche quindi, quella che offre Cima, dove il contesto sociale non è marginalizzato e dove l'analisi sintetica non va a detrimento di un ricco e funzionale apparato iconografico, rispondendo così in modo esauriente ed efficace ad una domanda innescata da un bisogno sempre crescente di leggere il passato attraverso griglie di lettura integrate, che permettano di coniugare conoscenze scientifiche, resti materiali e fonti scritte.

*† Riccardo Francovich
(professore ordinario di Archeologia Medievale nell'Università di Siena)
Settembre 1991*

1. NOTE DI GEOGRAFIA STORICA DEL FERRO

1.1 Generalità

Il ferro è il metallo più diffuso nel mondo ed è noto sporadicamente nelle culture materiali a partire dalla fine del III millennio a.C. ma entra nella storia dell'uomo nei manufatti piuttosto tardi e si diffonde soltanto dopo sconvolgimenti di portata continentale e una probabile crisi del mercato del bronzo che si manifesta a partire dal XIII secolo a.C. Il suo nome antico allude all'origine meteorica ed è forse questa la prima forma nella quale venne conosciuto. Il termine sumerico "*an-bar*" (fuoco del cielo) indicante il ferro è molto chiaro, così come "*ba-ni-pit*" in egiziano o "*sideros*" in greco¹.

Il ritardo con il quale il ferro entra nella cultura materiale mediterranea ed europea è da ricercare prevalentemente nella deperibilità dovuta all'ossidazione e alle scarse qualità meccaniche in assenza di processi di alligazione e di trattamenti termici.

I minerali di ferro sono molto numerosi e si trovano in abbondanza sulla crosta terrestre, sotto forma di ossidi o carbonati classificabili nel modo seguente²:

Sideriti - minerali a base di carbonato (FeCO_3), con contenuto teorico in ferro del 48,2%:

- carbonato di ferro spatico;
- carbonato di ferro litoide o sferolitoide.

Ematiti e limoniti - minerali a base di sesquiossido di ferro idrato o anidro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ e Fe_2O_3), con contenuto teorico di ferro da 59,9% a 70,0%,
idrati:

- ematiti brune mammellonari;
- ematiti brune ordinarie;
- limoniti ocre brune;
- minerali globulari;
- minerali oolitici;

anidri:

- ferro oligisto;
- ferro speculare;
- ematiti rosse di varia natura,

Magnetiti - minerali a base di ossido di ferro (Fe_3O_4), con un contenuto teorico di ferro del 72,4%:

- magnetiti di varia natura.

La metallurgia è possibile, sostanzialmente con le stesse tecniche, su minerali di natura sia chimica sia strutturale anche molto diversa. In antico l'uomo ha sfruttato i giacimenti più disparati, generalmente preferendo quegli ossidi che offrono maggiori

¹ Ramin 1977, p. 32.

² Perucca 1979, p. 106.

possibilità di riduzione in metallo, pure con mezzi relativamente semplici.

Nei processi di riduzione antichi la natura del minerale ha avuto grande influenza e in particolare le impurità che sempre lo accompagnano. Tra tutte la peggiore è lo zolfo che si trova in tracce nei minerali di ferro, sia allo stato naturale, sia - più frequentemente - sotto forma cristalli di pirite. Questa presenza qualora superi tassi trascurabili intorno o inferiori allo 0,05% rende il minerale impossibile a essere trattato. Un secondo elemento che disturba fortemente il processo di riduzione è il fosforo, soprattutto se in tracce superiori allo 0,1%. Non a caso i principali giacimenti sfruttati nell'antichità, come quelli anatolici, dell'Elba, del Norico o di Bilbao presentano tracce di fosforo largamente inferiori a questo tasso.

Una prima analisi delle aree minerarie nel bacino del Mediterraneo e nell'Europa continentale consente di costruire un quadro di riferimento sul quale collocare le informazioni storico-archeologiche sulle attività dell'uomo in questo campo della tecnica (v. figura pagina a fronte).

1.2 I poli mediorientali

Importanti depositi di magnetite sono presenti a Nord Est della penisola anatolica nell'area del Taurus vicino ad Amassia, Sivas e Tokat, come ad Alaya e Silinti. Queste sono le aree nelle quali gli Ittiti hanno avviato la lavorazione massiccia dei minerali di ferro mettendo a punto i primi trattamenti termici. Nella stessa Anatolia, antiche miniere di magnetite sono segnalate al monte Ida presso Andeira e a Magnesia³.

A Nord, la Caucasia, la Transcaucasia e l'Armenia sono regioni molto ricche di ferro. Nel Kuban, lungo il corso del fiume Kotscharka, si trova uno strato di magnetite particolarmente pura dello spessore di 30 m. Importanti depositi di ematite si trovano nella valle del Bojan presso Elisavetpol, sul fiume Bolnis, a Tamblut e al passo di Dyblaki vicino a Miskan. Giacimenti di magnetite sono segnalati nella parte orientale del distretto di Karabagh⁴. A sud in Siria, si trovano antiche miniere presso Germanicia, peraltro poco ricche; mentre depositi sfruttati dai fenici sono segnalati nella parte meridionale del Libano e lungo le pendici del monte Carmelo vicino a Izkim.

Miniere di età romana sono note in Transgiordania nei pressi di Ain Tab, Rheseya, Birma e Mogharet el Warda.

Tracce di antiche miniere per lo sfruttamento di depositi, peraltro molto poveri di ematite e limonite sono presenti presso Soli, Paphos e Tamassos nell'isola di Cipro.

Giacimenti di ematite sono segnalati anche a Wadi Baba e in altre valli della penisola del Sinai. Lo stesso minerale si trova a Wadi Dib, mentre a Wadi Halfa si trovano banchi di ferro oolitico⁵.

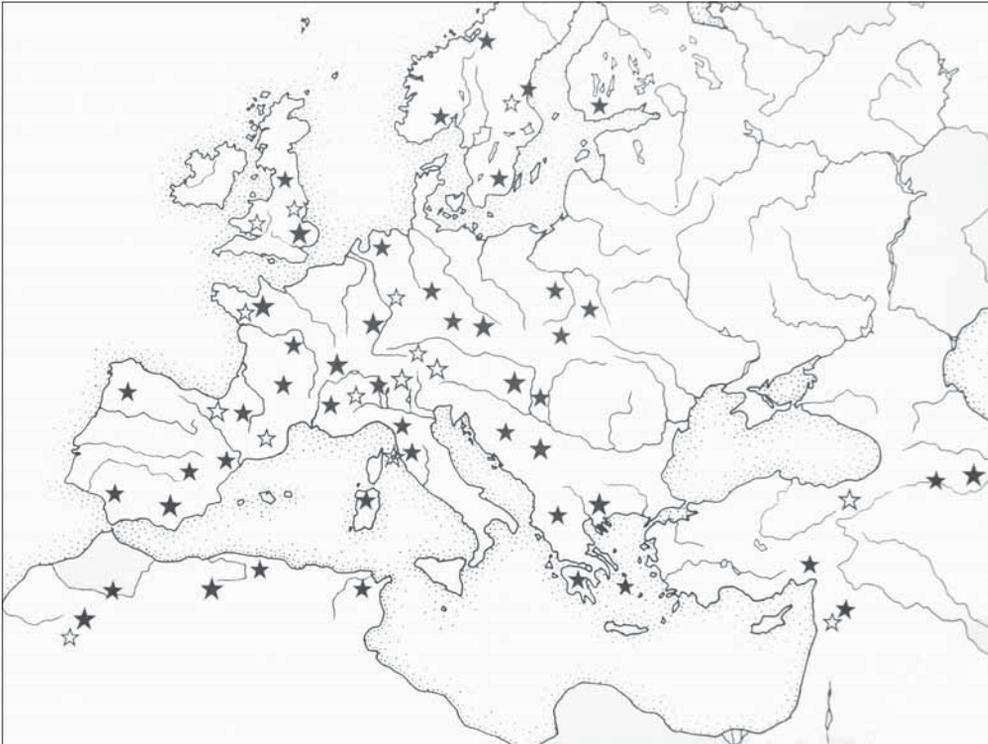
³ Forbes 1972, p. 195.

⁴ Ivi, p. 194.

⁵ Ivi.

1.3 Il polo ellenico

La penisola ellenica e le isole del mar Egeo dispongono di numerosi piccoli distretti minerari che hanno alimentato sin dal II millennio a.C. forme locali di metallurgia. Plainer ritiene che miniere sotterranee, non soltanto di argento, fossero attive già nel VI - V secolo a.C. ma le documentazioni non giungono a epoca precedente al I - II secolo a.C. Le miniere chiaramente riconosciute sono quelle vicine a Cap Taenaron nelle Cicladi, quelle del monte Taigeto vicino a Sparta e altre in Macedonia⁶.



Distribuzione dei principali giacimenti di ferro in Europa e nell'area mediterranea. Le stelle scure indicano la localizzazione dei principali giacimenti; quelle chiare i giacimenti di minerale che contengono meno di 0,1% di fosforo.

Altri piccoli giacimenti sono segnalati in diverse isole dell'Egeo, tra cui Syros, Cythnos, Ceos, Seriphos, Siphnos, Gyaros. Depositi di varia natura sono anche presenti in Samotracia, a Samo e a Rodi⁷.

1.4 Il polo italiano

Le attività estrattive e metallurgiche del ferro hanno importanti radici in Sardegna dove risultano fiorenti anche le estrazioni di minerali di rame, sebbene nelle fasi più recenti si venga profilando sempre più nettamente il predominio dell'area elbana. Que-

⁶ Plainer 1969 p. 33.

⁷ Ivi p. 34.

1. Note di geografia del ferro

sta, particolarmente ricca di minerali, diviene il baricentro di un esteso distretto minerario-metallurgico attivo a partire dall'inizio del I millennio a.C., per crescere e affermarsi nei secoli IX e VIII a.C.⁸.

L'attività estrattiva della magnetite e dell'ematite dell'Elba si accompagna con la metallurgia che consente la produzione di ferro in masselli, per larga misura esportato come semilavorato⁹. Di questo periodo sono noti quasi 100 siti nell'isola e numerosi altri nell'entroterra continentale antistante, particolarmente a Populonia dove giganteschi



Potente vena di goethite nella grotta della Monaca in Calabria. Il minerale è costituito da ossido-idrossido di ferro - FeO(OH), contenente circa il 73% in peso di metallo. Da questa grotta provengono numerosi attrezzi in pietra preistorici riferibili all'attività di cava di materie per produrre pigmenti, come ocre ecc. (v. p. 85). (Da Breglia et al., 2016).

cumuli di scorie sono le testimonianze più tangibili della colossale attività estrattiva e metallurgica che fanno di questo centro uno dei principali poli siderurgici dell'antichità¹⁰.

Un'area mineraria di grande rilievo, già nota in età Romana, ma attiva soprattutto nel Medioevo, è collocata nelle Alpi centrali italiane in Val Trompia, val di Sclava, val Seriana, val Brembana, e in misura minore in Valcamonica, ove si trovano

importanti giacimenti di siderite di origine triassica e di ematite¹¹.

Nelle Alpi Occidentali, sin dall'età Romana risultano sfruttati i giacimenti di ematite canavesani e più tardi, a partire dal XVII secolo, anche quelli di ottima magnetite della val Chiusella (Canavese) e val di Cogne (Valle d'Aosta)¹². Tracce di sfruttamento di piccole miniere durante la seconda età del Ferro sono state scoperte nell'alta valle Orco (Ceresole Reale)¹³, dove è stato rilevato un atelier metallurgico attivo fino all'alto Medioevo. Nella parte orientale della catena alpina, la valle dell'Adige conta numerosi distretti estrattivi. Un modesto giacimento di ferro sfruttato sin dal I millennio a.C. è noto anche in Calabria presso Stilo.

⁸ Grant 1982, p. 25.

⁹ Camporeale, Morolli 1985, p. 50.

¹⁰ Si stima che nella valle della Fucinaia presso Massa Marittima si trovino 50.000 t di scorie di ferro, 15.000 nella Valle Lunga presso Gherardesca, mentre a Populonia si stima che ve ne fossero circa 2.000.000 di t. Questi scarti di lavorazione accumulati in luoghi marginali o impiegati per seppellire le tombe monumentali della necropoli di San Cerbone presso il golfo di Baratti sono state sfruttate recentemente per alimentare l'industria metallurgica piombinese con azioni di cava durate oltre trent'anni.

¹¹ Perucca 1979, p. 498.

¹² Cima 1989, p. 33.

¹³ Cima 2023, p. 185.

1.5 Il polo iberico

La Spagna occupa un posto di rilievo nella siderurgia antica. I giacimenti già noti ai greci e ai latini si trovano nella parte meridionale della penisola, nella regione di Cartagena, a nord di Granada, nella regione di Huelva, ai bordi della Sierra Morena, sull'altopiano della Castiglia, nelle Sierre centrali e nella Betica¹⁴.

La più famosa, anche se non la più importante area siderurgica iberica è nel Nord della penisola, ove si trovano importanti giacimenti di magnetite. Plinio il Vecchio cita come centri di particolare rilievo Bilbili (Bilbao), Turiassone (forse identificabile con le Asturie) e la Catena Cantabrica¹⁵. Questo polo è rilevante in età romana, anche se probabilmente in misura inferiore rispetto all'enfasi che Plinio il Vecchio gli dedica¹⁶. In una fase imprecisata questo centro induce attività estrattive e metallurgiche anche nel versante francese dei Pirenei, particolarmente nella contea di Foix, in maniera diffusa fino alla Montagna Nera¹⁷.



Vene di minerali di ferro nel polo minerario di Scunthorpe (Yorkshire - UK). Qui, come in diversi ambienti minerari delle Alpi e di altri contesti è possibile cavare il minerale senza necessità di produrre onerosi cavi di miniera. (Da R. Brook).

Piccoli centri minerari sono noti anche nel Sud del Portogallo, dove le ricerche archeologiche hanno dimostrato la presenza di numerosi centri produttivi siderurgici sin dalla Protostoria.

1.6 I poli centro-europei

L'Europa continentale contiene grandi giacimenti di ferro sfruttati in maniera differente a partire dalla Protostoria. Le più antiche attività estrattive e metallurgiche del ferro sono ascrivibili al Norico, con una vasta area individuabile nelle regioni di Stiria, Carinzia e in parte forse nel Tirolo italiano, dove si maturano le esperienze più importanti della metallurgia celtica. Tra i tanti centri di questo vasto polo vale ricordare

¹⁴ Rothemberg, Freijerio 1981, p. 166.

¹⁵ Gaio Plinio 1988, p. 261.

¹⁶ Ivi.

¹⁷ Sablayrolles 1982, p. 205.

1. Note di geografia del ferro

Magdalenberg in Stiria ma anche l'antica città di Noreia dove si ha notizia di fucine e ferriere sin dagli ultimi secoli del I millennio a.C.

Nell'area balcanica una grande area di produzione siderurgica è segnalata da diversi scavi archeologici in Bosnia nella valle del fiume Sana¹⁸.

A Valem St. Vid in Ungheria, a notevole profondità in una miniera di rame, risulta estratta anche siderite, lavorata nelle aree circostanti, ove sono noti diversi siti che contengono resti di forni riferibili a un orizzonte tardo di Hallstatt¹⁹.



Miniera di zolfo di Strongoli (Calabria) nei primi anni del XX sec. La fotografia rende l'idea del difficile ambiente delle miniere, soprattutto nei paesi mediterranei, dove il calore accumulato nei cavi e l'umidità impediscono ai minatori di indossare indumenti, pena gravi irritazioni. Come nella Preistoria il minerale è estratto con i picconi e trasferito nelle ceste. (Da P. Rende).

Intorno al I secolo a.C. estrazioni di minerali di ferro sono attestate in Gallia e particolarmente in Lorena e Lussemburgo ove si trovano importanti giacimenti di limonite di origine lacustre e nei Vosgi²⁰, dove sono noti importanti batoliti ricchi di minerali di ferro e in particolare ematite. I giacimenti in Gallia sono ricordati anche da Giulio Cesare e da Strabone a Biturigi, Sociati e Petro-

corii.

Giacimenti di ematite di ottima qualità coltivati sin dai secoli VIII e VII a. C. si trovano più a Sud nel Giura Vodese²¹. Importanti giacimenti di ferro sfruttati intensamente nel Medioevo sono presenti nelle montagne dell'Allevard nel Delfinato ove ha sede un'importante attività siderurgica legata alla certosa di Saint Hugon²².

Giacimenti di minore entità, sfruttati sin dalla Preistoria, sono presenti in numerosi regioni francesi della Champagne, del Perigord o in Nivernais²³.

Attività minerarie e metallurgiche del ferro di origine protostorica sono note in Bretagna²⁴ e nella vicina Normandia, particolarmente nel centro di Beaumont²⁵.

Un polo produttivo di rilevante interesse è quello attivo a partire dal III secolo d.C. ai monti Santa Croce in Polonia, ove viene estratta e lavorata una buona qualità di ema-

¹⁸ Forbes 1972, p. 196.

¹⁹ Bromehead 1961, p. 577.

²⁰ Fluck, Bari 1982, p. 10 e Cuppers 1983, p. 19.

²¹ Pelet 1971, p. 9.

²² Bautiero 1960, p. 9.

²³ Gilles 1969, p. 287.

²⁴ Giot et al. 1979, p. 304.

²⁵ Dureault 1961, p. 3.

tite²⁶. Un secondo importante giacimento polacco è quello di Rudki, ove sono attestati rilevanti attività estrattive medievali²⁷ a cui si associa un esteso distretto metallurgico con numerose ferriere.

Nella stessa epoca le tribù germaniche delle pianure centro-europee sfruttano depositi di noduli di limoniti di origine lacustre stratificati nelle paludi²⁸.

Giacimenti di siderite coltivati in epoca medievale sono presenti anche nell'Hartz, nel Wurtemberg e in Westfalia²⁹.

1.7 I poli nordeuropei

Le isole britanniche non dispongono di grandi depositi di minerali di ferro, ad eccezione dei giacimenti limonitici della Cornovaglia³⁰ dove sono note attività estrattive molto antiche. Modeste coltivazioni a cielo aperto sono attestate nella tarda Preistoria e in Età Romana nella foresta di Dean nel Durham, nel Somerset e nel Norfolk³¹.



I grandi cavi delle antiche miniere di Persberg in Svezia.

Durante l'Età Romana si segnalano in particolare i tre grandi poli produttivi siderurgici del Weald, della foresta di Dean e dei colli Giurassici, accanto ai quali una rete di piccoli centri secondari risulta distribuita prevalentemente in prossimità delle coste³², particolarmente nel Cumberland e nel Lancashire, come peraltro in Cornovaglia dove sono noti giacimenti di varia natura, tra i quali anche ferro.

Modeste tracce di attività siderurgica antica, risalente all'età del ferro, sono presenti anche in Irlanda³³.

Coltivazioni minerarie e metallurgia basata sul forno a camino sono attestate in Età Tardo-Antica a Pickwort nel Lincolnshire e a Withylam nel Kent³⁴.

Importanti giacimenti di magnetite sono sfruttati sin dall'Alto Medioevo in Svezia, presso Jernkontoret nel Dalarna. Altri distretti in cui si segnalano sfruttamenti consistenti nella stessa epoca si trovano a Sud nello Smaland³⁵ e ancora a Norberg, Danne-

²⁶ Radwan, 1966, p. 63.

²⁷ Ivi, p. 63.

²⁸ Forbes 1972, p. 215.

²⁹ Perucca 1979, p. 489.

³⁰ Ivi e p. 488.

³¹ Tylecote 1966, p. 89.

³² Tylecote 1985, p. 171.

³³ Scott 1984, p. 153.

³⁴ Ivi.

³⁵ Magnusson 1984, p. 122.

1. Note di geografia del ferro

mora, e Persberg³⁶. Per secoli, gli abitanti dell'odierna regione del Trøndelag, nel centro della Norvegia, hanno ricavato grandi quantità di ferro di ottima qualità dai minerali tratti dalle paludi, con i quali si sono alimentati importanti centri siderurgici, dove si è registrata la produzione di armi e utensili. Si stima che la produzione abbia raggiunto il picco di circa 40 tonnellate all'anno intorno alla fine del II secolo d.C.³⁷.



Atelier di un fabbro africano che lavora il ferro con gli stessi metodi del I millennio a.C. (Da Science 2009, vol.323).

tarda Preistoria e poi dai Fenici che non a caso proprio in quest'area fonderanno Cartagine, una delle loro più fiorenti colonie.

Altri giacimenti, già sfruttati in antico, si trovano presso capo Tenes e nell'entroterra a breve distanza dall'oasi di Qala'a Hawara.

Nel medioevo qualcuno di questi centri minerari risulta abbandonato, soprattutto quelli prossimi a capo Bougaroûn e capo Tenes, mentre un'intera nuova provincia mineraria viene fondata nell'Alto Atlante³⁸.

All'estremo opposto del continente, in Egitto, giacimenti di magnetite sono segnalati tra Assuan e Shellal e anche le alluvioni del Nilo contengono molta magnetite e ocre rosse e marroni, mentre limoniti sono presenti nelle oasi del deserto occidentale, ma nel complesso, data anche la mediocre qualità dei minerali, questa regione non ha conosciuto attività estrattive importanti.

1.8 I poli nordafricani

Tunisia, Algeria e Marocco sono aree di grande interesse per la siderurgia antica, particolarmente per quanto attiene alla grande presenza dell'Islam medievale.

Centri come quelli dei monti Nefza, di Tebessa, di capo Bougaroûn o quelli lungo il fiume Ouenza, risultano già sfruttati nella

³⁶ Magnusson 1984, p. 122.

³⁷ Cech, Rehren 2014, p. 7.

³⁸ Magnusson, 1991, p. 86.

2. LA RIDUZIONE DEI MINERALI DI METALLO

2.1 Il processo di riduzione

Un decisivo passo nella diffusione del ferro presso le comunità antiche è legata alla messa a punto di un corretto sistema di riduzione e ciò si registra quando si giunge a un elevato livello di scorificazione del minerale. In origine il processo sembrerebbe avvenuto nei rudimentali forni a catasta in uso nella metallurgia del rame¹, via via migliorati con la protezione del focolare, ma il ferro ha esigenza di alte temperature e nella continua evoluzione risultano raggiunti risultati accettabili soltanto quando l'evoluzione dei forni diviene tale da garantire temperature di processo più elevate di quelle in uso nei forni per il rame, grazie al miglioramento della coibentazione del nucleo centrale contenente il fuoco. A questa innovazione si aggiunge l'impiego di fondenti in grado di migliorare la liquefazione delle scorie². In questo modo si è ottenuta una classe di metallo più puro e di conseguenza più adatta alle successive lavorazioni e ai trattamenti.

Le principali difficoltà nella riduzione dei minerali di ferro risiedono nell'elevata temperatura di fusione di questo metallo che è di circa 1.536°C, a differenza del rame che fonde a 1.085°C. Gli antichi metallurgisti, operando per analogia con il processo di riduzione dei minerali di rame, hanno messo a punto un sistema tecnologico che consente la riduzione della maggior parte dei minerali di ferro senza giungere alla fusione del metallo. Si tratta del sistema cosiddetto del "basso fuoco", che è stato applicato ininterrottamente dalla Protostoria fino al decollo industriale del XIX secolo e in qualche sporadico caso, presso le tribù dell'Africa sub-sahariana ed equatoriale fino all'inizio del XXI secolo. Le tecniche di produzione del ferro mediante metodi tradizionali, noti in Medio Oriente e in Europa sin dalla prima età del Ferro, risultano ancora largamente diffuse in Africa nel XIX e all'inizio nel XX secolo, quando le terre interne del continente incominciano a essere percorse da esploratori e missionari che redigono accurati resoconti con interessanti documentazioni fotografiche.

Molte tecnologie protostoriche risultano ammantate di un alone magico-religioso come lo erano quelle della Grecia antica, note attraverso documenti archeologici e letterari. Sandra Blakely ha studiato a fondo le pratiche mistico-esoteriche legate alla produzione dei metalli nell'antica Grecia e le ha comparate con le osservazioni etnologiche e archeologiche di diversi siti metallurgici dell'Africa sub-sahariana ancora attivi nel corso del Novecento, riscontrando interessanti paralleli, sia tecnologici, sia magico-rituali, che rimandano a complessi riti misterici, con l'invocazione di entità intermedie tra gli uomini e la divinità, esattamente come avveniva nell'antica Grecia con il "δαίμων", ovvero il demone, nell'accezione antica di essere medianico tra il divino

¹ Eliyahu-Behar 2012, p. 257. Quello studiato in Israele al sito di Tell es-Safi/Gath, è solo uno dei casi in cui nei contesti metallurgici dell'inizio del I millennio a.C. si rinvenivano tracce di metallurgia del rame unite a quelle della metallurgia del Bronzo. Situazioni analoghe sono note in Anatolia (cfr Kucukarslan 2012, p. 43 e segg.).

² Forbes, 1981, p. 606. Solitamente si tratta di rocce silicee o calcaree sminuzzate inserite nella carica del forno.

2. La riduzione dei minerali in metallo

e l'umano, in grado di intermediare le istanze degli uomini presso la più alta divinità, perorando la causa alla quale gli umani tendono³.

Il singolare parallelo tra Grecia antica e Africa sub-attuale deriva dalla propagazione delle conoscenze tecnologiche verso le terre interne del continente, avvenuta sin dalla protostoria, con penetrazioni che hanno raggiunto tutti i principali centri produttivi, i quali risultano applicare sistemi tecnologici e aspetti magico-rituali molto simili a quelli della Grecia antica, riproducendo un intero complesso di credenze e pratiche strettamente legate alla sequenza tecnica delle operazioni che compongono il processo produttivo⁴.



Piccolo forno a camino costruito con forme antropomorfe femminili nel complesso produttivo siderurgico di Nyanga in Zimbabwe. Si noti il seno modellato in argilla, l'ombelico e la cintura in vita indicata come un talismano per migliorare la fertilità. (Da Chirikure 2015).

Il contatto tra l'ambiente mediterraneo, dove sin dal X secolo a.C. si diffonde la tecnologia greca, e le regioni sub-sahariane risulta mediato dai Berberi, conosciuti da Erodoto come "Libici", e dai Garamanti attraverso le piste nel deserto, definite da almeno tre itinerari rimarcati da molte centinaia di incisioni con immagini di carri. Per questa via, le tecnologie e le credenze consolidate nei contesti mediterranei, unitamente alle conoscenze tecniche, raggiungono le fertili terre dell'Africa centrale e di qui s'irradiano in tutto il continente.

L'immagine di una donna che partorisce è centrale nella metallurgia dell'antica Grecia e, secondo le credenze, così come il parto, il processo metallurgico è mediato dai *daimones* che vanno propiziati in modo adeguato, affinché proteggano le fasi produttive dalle forze e dagli spiriti negativi. I rituali africani sub-attuali legati alla riduzione dei minerali di ferro in metallo conservano quasi intatto questo universo magico-apotropaico riproducendo analogie stringenti con le pratiche e gli atteggiamenti che accompagnano il parto. Nell'antica Grecia la partoriente era circondata da una schiera di maschi accuditori che proteggevano il bambino in arrivo o appena nato, chiaramente vulnerabile, dagli spiriti negativi e dalle forze avverse che tendevano a distruggerlo. Come nel caso della tutela del neonato da parte degli uomini che lo proteggono, il processo siderurgico praticato in Africa fino agli esordi del XX secolo viene accompagnato dai metallurgisti con rituali, musiche, danze e pratiche esoteriche che tendono a

³ Blakely 2006, p. 78.

⁴ Ivi, p 59.

propriarlo. Per questo i forni da ferro africani richiamano la donna nel nome e talora anche nelle forme esteriori secondo le cure e i gesti della partoriente. La sequenza delle analogie è complessa e prima dell'avvio del processo di ossidoriduzione è prevista una lunga preparazione durante la quale vengono introdotte nel forno delle pozioni normalmente somministrate alle donne che intendono concepire.

Sebbene nell'immenso contesto sociale sub-sahariano ogni popolo declini queste pratiche in maniera autonoma e variabile, nella sintesi delle pratiche e dei gesti è possibile riconoscere con una certa precisione i rituali protostorici a carattere misterico che derivano dalle pratiche e dai riti dell'antica Grecia.

Il parallelo tra Grecia antica e Africa sub-attuale deriva dalla singolare staticità del mondo sub-sahariano che ha tramandato usi e consuetudini attraverso i secoli e per questa ragione ancora nel corso del XX secolo è stato possibile assistere a pratiche ricorrenti tipiche del mondo antico, particolarmente significative proprio nel campo della siderurgia e sintetizzabili in tre principi fondamentali⁵:



Ricostruzione di un basso fuoco a camino con il corpo tronco-conico e crogiolo infossato presso Oska Denka nel sud-est dell'Etiopia (valle dell'Omo). Il metallurgista è nudo nel corpo del forno e ricostruisce la struttura con un impasto di argilla e scorie sminuzzate in granuli. A lavoro ultimato, prima di avviare il processo di riduzione sacrifica una capra e ne sparge il sangue sulle pareti. (Da Haaland 2004).

1. Affinché la riduzione del ferro abbia successo una varietà di forze soprannaturali deve essere propiziata attraverso i *daimones*, con cerimonie e rituali che prevedono inni cantati coralmemente dai metallurgisti e l'applicazione di materiali e sostanze particolari al forno, come il sangue di un animale sacrificato;
2. I metallurgisti, con la loro conoscenza devono dirigere le diverse fasi del processo e anche le pratiche magico-religiose, pertanto oltre alle competenze tecniche assumono poteri sacerdotali sollecitati con lunghi periodi di ascetismo e isolamento dal gruppo sociale di appartenenza;
3. Il processo di riduzione dei minerali in metallo prevede l'impiego di simbolismi di varia natura, come l'incisione o la composizione di figure antropomorfe femminili e tabù sessuali, spesso con il celibato temporaneo dei metallurgisti e la rigorosa esclusione delle donne dall'ambiente degli atelier, soprattutto se impure a causa del ciclo⁶, perché l'elemento femminile dedicato al processo è il forno a camino o a manica, dotato di un adeguato ventre capace di partorire il metallo.

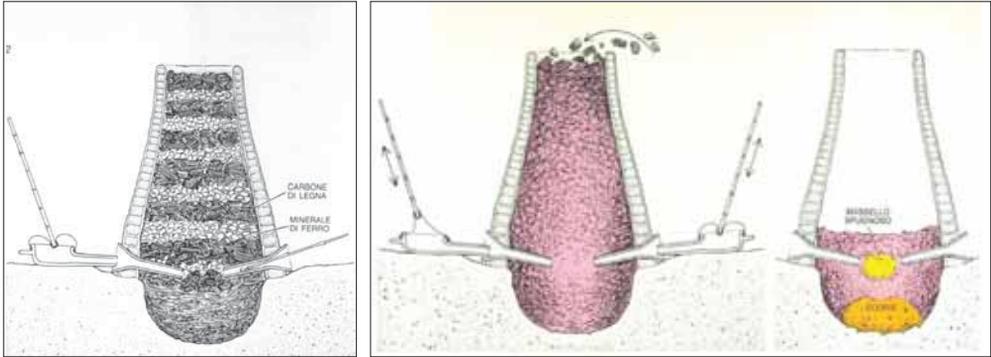
Anche gli aspetti esteriori hanno un senso, come attesta la letteratura antica. Sappiamo che i forni ateniesi erano abbelliti da figure apotropaiche con significati esoterici, così come i forni africani sono contrassegnati da figure femminili, quasi sempre

⁵ Avery, Van der Merwe, Saitowitz 1988, p. 168 e Van der Merwe, Avery 1987, p. 112.

⁶ Haaland 2004, p. 6.

2. La riduzione dei minerali in metallo

mostrate in stato gravidico, quando addirittura non sono gli stessi forni ad assumere forme anatomiche con aspetti che richiamano il corpo della donna, secondo una sintesi magico-tecnologica che si rifà alla procreazione. L'analogia è con l'atto del concepimento quando l'essenza dell'uomo s'infonde nella donna ed essa elabora formulando e assemblando il nuovo essere. Dalla trasposizione di questo fenomeno naturale sul piano misterico scaturiscono i caratteri del dio che regola il processo metallurgico. Efesto è deforme e il suo difetto si trasforma in potenza sessuale poiché quello che non



Schema del carico a strati del forno a manica mediante livelli alterni di carbone e minerale arrostito e, a lato, le fasi del procedimento con il blumo di ferro spugnoso agglutinato nel punto di massima concentrazione della temperatura all'altezza delle tuyères collegate alle fistole dei mantici. (Da Francis Van Noten - Raymaekers 2008).

possono le sue membra è trasferito al sesso. Un riflesso di questa cosmogonia sembra ricorrere anche nella mitologia legata ai processi siderurgici barbarici e si riscontra ancora nella tradizione alto-medievale; per questo non appare un caso che il mitico metallurgista norreno Weland della mitologia norrena sia zoppo, analogamente a Efesto.

Dal punto di vista strettamente tecnico, nel 1966 Cyril Stanley Smith e Theodore Wertime hanno avanzato l'ipotesi che la scoperta della riduzione degli ossidi di ferro discenda dal fatto che nei forni per la riduzione del rame venivano impiegati minerali di ferro come fondente⁷. Ciò anche considerando che non vennero introdotte modificazioni sostanziali nella struttura materiale del basso fuoco impiegato nella riduzione, prima dei minerali di rame (processo di coppellazione) e più tardi di quelli di ferro, fino alla prima metà del I millennio a.C.

In origine il ferro viene prodotto in piccoli forni a catasta con pozzetto alla base, derivati dal focolare aperto, unicamente con un riscaldamento prolungato del minerale opportunamente trattato, mediante arrostitimento e lavaggio preventivo.

Verso la metà del I millennio negli ambienti produttivi europei più importanti vengono introdotti i forni a camino, derivati direttamente dal focolare aperto, semplicemente infossando il focolare in un pozzetto e successivamente creando una struttura protettiva cilindrica o tronco-conica cava mediante argilla. Questo sistema sin dalla Protostoria conosce grande fortuna ed è adottato da tutti i distretti produttivi mediorientali, europei

⁷ Marechal 1983, p. 175.

e africani con poche varianti tecnologiche.

Questi sistemi sono stati documentati ancora in vivo fino ai primi anni del XXI secolo. Dal punto di vista tecnologico, i processi produttivi descritti da archeologi ed etnologi relativamente a questo sistema, sono del tutto analoghi a quelli illustrati nei trattati cinquecenteschi europei che descrivono la successione delle fasi operative⁸.

Sulla base degli studi e degli scavi archeologici condotti sui resti dei forni a manica per la riduzione del minerale di ferro, negli anni Sessanta e Settanta del Novecento



Un basso fuoco a camino di proprietà del metallurgista Soro Chukama. La struttura ancora in attività nel villaggio Senufa di Koni in Costa d'Avorio nel 2019. Si tratta di una fonderia da ferro tradizionale, analoga alle strutture protostoriche. L'impianto comprende il forno a camino e si compone di due unità: il forno stesso e a pochi metri di distanza la fucina con un piccolo portico, contrassegnata da un altorilievo propiziatorio con fattezze femminili rivolto al lato del forno, interpretabile come figura apotropaica posta a propiziare il processo metallurgico.

(A lato) Caricamento del forno con strati alterni di carbone e minerale. Al piede sono evidenti le fistole fittili (tuyère) dove vengono innestati i mantici, sigillandone il collegamento con argilla. (Fotografie R. Facchi).

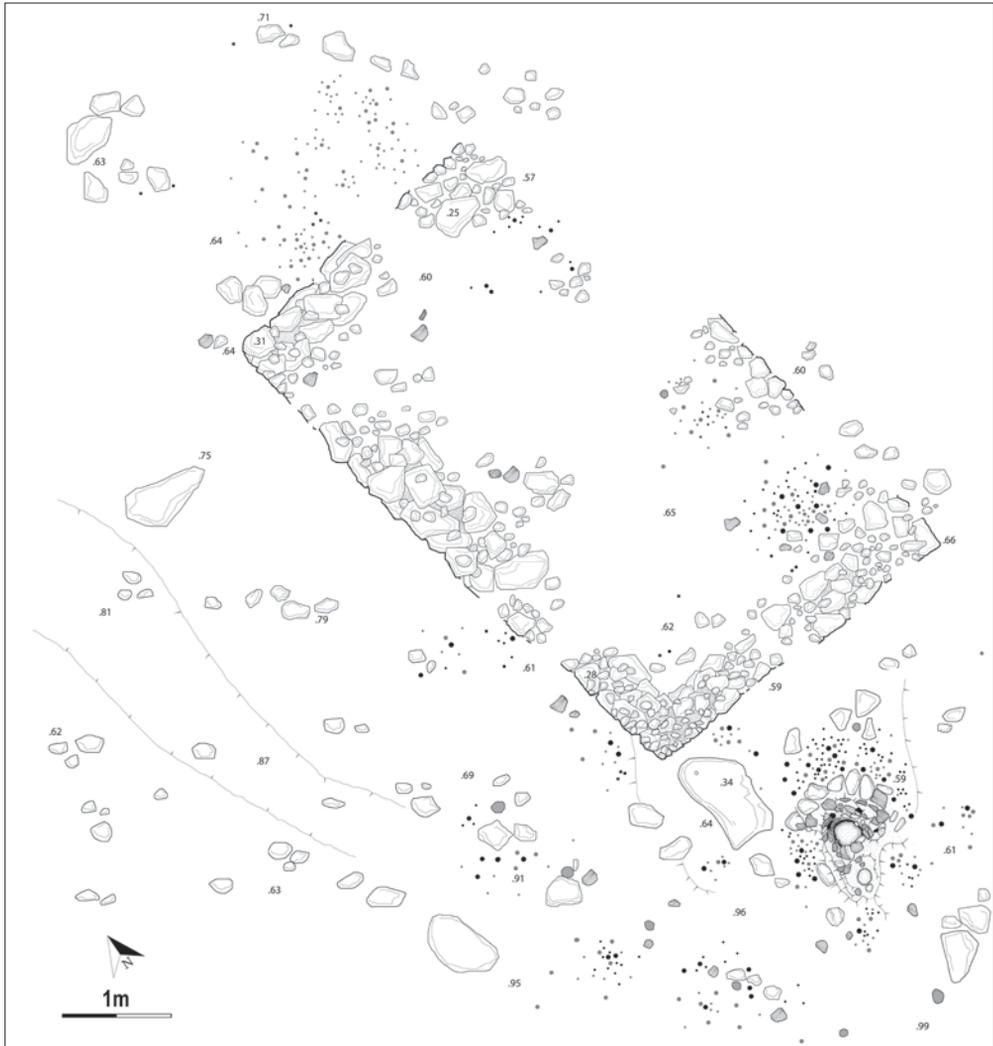
nella regione dei grandi laghi africani sono state proposte datazioni particolarmente interessanti, che si aggirano intorno al VII - VI secolo a.C. Sulla base delle attuali conoscenze archeologiche, questa appare la data più antica per la diffusione di questa tecnologia a Sud del Sahara⁹ e ciò sembrerebbe attestare la migrazione di gruppi umani verso le regioni centrali africane sin dalla Protostoria¹⁰

Al di là degli aspetti magici e dei riti propiziatori, il processo produttivo al forno a camino prevede una successione di fasi operative piuttosto precisa, sia nel caso di strutture piccole, sia in quelle di dimensioni più consistenti che in vari contesti talora superano i 2 m di altezza e 70-90 cm di diametro.

⁸ In particolare si rimanda a Vannoccio Biringuccio, 1540 e Giorgio Agricola, 1563.

⁹ Van Noten - Raymaekers 1988, p. 78.

¹⁰ Blakely p. 56.



Rilievo della ferriera di Scarmagno con il fornello in basso a destra. (Fotografia a fronte e stratigrafia a p. 48).

Un esempio di forno a pozzetto con piccolo camino, direttamente derivato dal forno a catasta è stato studiato nello scavo archeologico del sito rustico di Scarmagno (Torino), dove accanto a un atelier di fabbro di fine II secolo a.C. si sono conservati i resti di un piccolo forno con l'intero piano d'uso del complesso produttivo. In questo ambito si è studiato l'impianto del basso fuoco giungendo alla documentazione dettagliata del sistema tecnologico impiegato nella riduzione dell'ematite proveniente dalle vicine miniere delle valli canavesane. La datazione di questo sito rimanda ai decenni compresi tra la fine del II e l'inizio del I secolo a.C. La piccola ferriera, annessa a un'abitazione rustica, risulta condotta unitamente alle attività agricole da parte di un metallurgista che, compatibilmente con i ritmi della campagna, produceva piccole quantità di metallo per la forgiatura di attrezzi e strumenti. Si tratta di un sistema produttivo che si pone alla

congiunzione tra il basso fuoco a catasta e il più evoluto sistema a camino che alla fine del I millennio a.C. caratterizza i maggiori centri produttivi siderurgici lateniani.

Del piccolo forno sono stati studiati i resti consistenti nelle strutture basali, unitamente a una delle due piccole camere di ventilazione del mantice a membrana. La modesta struttura, era formata in muratura, legata con argilla cotta nell'uso e si stima che avrebbe potuto elevarsi per 50 - 70 cm, a formare una camera cilindrica aperta in alto. Alla base, due fistole praticate nella massa di argilla collegavano la coppia



Ricostruzione sperimentale di un basso fuoco a pozzetto con camino ripreso durante il funzionamento.

(A lato) Il fornello di Scarmagno a fine scavo con la grande lastra interpretata come banco da lavoro.

di piccole camere del mantice a membrana con la base del corpo cilindrico del forno dove avveniva il processo di riduzione. Qui, all'avvio era posta una carica a strati alterni

di carbone di legna forte (prodotto con ceppi di rovere, castagno o faggio), e minerale arrostito, bagnato all'atto del caricamento, fino alla colmatura. La ventilazione prodotta dalla coppia di camere a membrana azionate alternativamente da un aiutante forniva un flusso sostanzialmente continuo e in capo a una giornata di lavoro si giungeva alla produzione di un blumo spugnoso di ferro che si addensava agglutinandosi al fondo del fornello¹¹. Terminato il processo, la massa metallica veniva estratta e condensata a caldo mediante una prolungata martellatura alternata a fasi di riscaldamento alla forgia, giungendo alla produzione del massello semilavorato. Forse per le sue emissioni di fumi e gas tossici il basso fuoco era collocato all'esterno dell'edificio, ove alcune buche di palo lasciano intuire la presenza di una tettoia di protezione. Accanto al forno a pozzetto era sistemata una grande roccia tabulare sulla cui superficie piana vi era una grande coppella e due profondi fori del diametro di circa 3 cm, dove si ritiene fossero infissi dei ferri di contrasto per lavorazioni di sagomatura o piegatura di sbarre o lame metalliche (si pensa alla cerchiatura delle ruote dei carri o delle botti). Il masso, posto a

¹¹ Pantò, Cima 2019, p. 79.

2. La riduzione dei minerali in metallo

meno di un metro dal basso fuoco, è stato utilizzato come il principale banco di lavoro per la frantumazione del minerale nella coppella e come incudine. In adiacenza, lo scavo ha riportato alla luce la struttura basale di un edificio a pianta quadrangolare, quasi del tutto spogliato, costruito con muri calcinati privi di fondazione, strutturato alla base con grandi blocchi e lastre di cava legati con poca malta di calce, mentre gli alzati presentavano tessitura muraria formata da ciottoli legati con un semplice impasto di argilla.



(Archeologia sperimentale) Estrazione del blumo di ferro spugnoso dalla bocca del forno a camino. (Fotografia C. König).

(Sotto) Blumo di ferro agglutinato appena estratto dal basso fuoco nell'atto di venire martellato all'incudine per produrne la condensazione. (Da Francis Van Noten - Raymaekers 2008).

Questa struttura conteneva, sia l'atelier di rifinitura, sia l'abitazione del metallurgista. Lo spazio produttivo interno appare suggerito da un consistente livello carbonioso con frammenti di laterizi, ove si ritiene vi fosse un fuoco di forgia e l'incudine per le lavorazioni di forgiatura dei manufatti mediante deformazione plastica a caldo. Un vano d'abitazione, verosimilmente ricavato nello stesso ambiente, era forse separato con un tramezzo leggero suggerito da una buca di palo. A lato dell'edificio, un piccolo ambiente con muri basali in pietra a secco è stato interpretato come il deposito di materiali, tra i quali il carbone di legna, denunciato da diverse concentrazioni di piccoli frammenti di carbonella. In posizione antistante l'edificio, labili tracce di una roggia lasciano intendere che vi fosse un convogliamento d'acqua forse utilizzata nel processo produttivo per bagnare il minerale da immettere nel basso fuoco all'inizio del trattamento di riduzione e per gli eventuali trattamenti termici da praticare sui manufatti finiti.

La cava preistorica e protostorica del minerale nei giacimenti solitamente non richiedeva grandi escavazioni poiché nei territori montani e vallivi di tutto il mondo le vene e gli accumuli di minerali di ferro superficiali sono piuttosto diffuse e non è infrequente rinvenire notevoli quantità di ottima ematite anche nei depositi alluvionali. Per larga

misura questo minerale è un sesquiossido di ferro (Fe_2O_3). Nei giacimenti si presenta come un ammasso lenticolare di colore grigio arrossato, talora lucente, ed è riducibile in metallo con un rendimento accettabile in un processo di ossido-riduzione attuato, sia con bassi fuochi a catasta, sia con quelli a camino. Dopo la cava del minerale, la prima fase operativa riguarda la cernita e il trattamento di separazione preventivo con un'accurata selezione e sminuzzamento in blocchetti delle dimensioni di una noce. Successivamente il minerale viene lavato entro fosse, dove si lascia macerare per un certo tempo, oppure viene esposto lungamente alle intemperie. Successivamente si passa all'arrostimento entro apposite fornaci a forma di tino aperto, dove si pone il minerale bagnato con l'acqua ancora trattenuta nelle fessure interstiziale a strati alterni con legna ben secca. Qui, in capo a qualche ora si raggiungono temperature prossime a 700°C dove lo zolfo e i solfuri contenuti come impurità (soprattutto piriti, ovvero solfuro di ferro FeS_2), si trasformano producendo forti emissioni gassose puzzolenti e reattive ricche di acido solforico (H_2SO_4). A questa fase segue un ulteriore lavaggio in acqua o per esposizione alle intemperie, in seguito al quale si può procedere alla riduzione al basso fuoco, caricandolo dall'alto a strati alterni con un buon carbone di legna compatto.

Entrambi i sistemi tecnologici del forno a catasta e del forno a camino, se ben condotti consentono di raggiungere temperature intorno a $1.000 - 1.100^\circ\text{C}$, ben lontane dai livelli di temperatura richiesti per la fusione del ferro (1.536°C), ciononostante il processo produttivo è possibile. All'interno del basso fuoco l'ossidoriduzione del minerale per la produzione del metallo avviene grazie alla scarsità di ossigeno che si manifesta nel ventre del forno, quando l'ingente massa di carbone viene coinvolta nella combustione. Ciò genera grandi quantità di ossido di carbonio, particolarmente reattivo, che per poter completare la combustione, sottrae ossigeno al sesquiossido, degradandolo a monossido (FeO). Successivamente, con il prolungarsi della permanenza in camera di combustione, in presenza della massa di carbone surriscaldato avviene una successiva reazione chimica, riducendo anche il monossido e liberando molecole di metallo puro, secondo una sequenza di reazioni chimiche ricorrenti con sempre maggiore frequenza a mano a mano che il procedimento evolve, grazie all'insufflazione di aria mediante i mantici e l'eventuale ulteriore ricarica di combustibile dall'alto¹²:



Non giungendo alla fusione del metallo, il processo di ossidoriduzione avviene su scala microscopica e il metallo liberato si agglutina scendendo in basso per via del peso a formare una sorta di spugna pastosa e incandescente di ferro quasi puro. Con il procedere della combustione, alla base del forno scendono anche quantità di minerale con una consistente fase metallica non liberata, che forma una scoria molto pesante e ricca (loppa). Talora questa viene sminuzzata e ricaricata con il minerale in un succes-

¹² Cima 1985, p. 17.

2. La riduzione dei minerali in metallo

sivo procedimento, consentendo un ulteriore recupero di metallo.

La produzione del ferro mediante il basso fuoco comporta un procedimento piuttosto complesso con durate di 20 - 50 ore a seconda delle dimensioni. La resa complessiva del sistema, calcolata in base al metallo contenuto nel minerale e quello effettivamente prodotto è bassa e stimata in un massimo del 15-20% in peso.

Nel basso fuoco a camino si avvia la combustione dal basso alimentandola con l'insufflazione continua di aria mediante i mantici a doppia camera azionati manualmente per l'intera durata del processo. L'atmosfera ossido-riducente e la forma rastremata in alto del camino risulta piuttosto efficace, consentendo un agevole caricamento dall'alto. L'intero processo si gioca sulla giusta quantità di aria immessa dai mantici all'interno del ventre del forno che alimenta la combustione del carbone e provoca l'innalzamento della temperatura, ma deve essere dosata al fine di provocare l'innesco del processo chimico di riduzione degli ossidi di ferro prolungando l'azione. Nel dosaggio dell'aria risiede il buon esito del procedimento e proprio in questo aspetto emerge la professionalità del metallurgista, che in base a una serie di indizi comanda agli addetti ai mantici di aumentare o diminuire l'azione¹³. Le fistole fittili (*tuyère*) poste alla base dei forni sono essenziali per queste regolazioni e la loro struttura materiale ricorre senza significative variazioni, sia nei forni da ferro della protostoria mediterranea, sia nelle strutture rimaste in uso fino alla fine del XX secolo nelle terre continentali dell'Africa.

Il metallurgista esperto comprende con buona approssimazione l'evolversi del processo, osservando i fumi che fuoriescono dall'alto del camino e stima quando il blumo, ovvero la spugna di ferro pastosa e incandescente può essere estratta. Durante la combustione il combustibile lentamente si consuma e la massa metallica agglutinata s'ingrandisce e scende verso la base del forno. Nelle fasi conclusive, solitamente questa viene saggiata con un saggio metallico attraverso una delle fistole dei mantici, per verificarne sia la posizione, sia la consistenza. Completato il processo, evidente nella sensibile diminuzione delle emissioni di fumi, il blumo metallico viene estratto rompendo lo strato di argilla concotta che chiude l'apertura basale. A quel punto uno o più aiutanti, muniti di pesanti martelli o mazze, agendo su un incudine fissato a terra o su un solido masso, procedono a una rapida martellatura per la condensazione e compattazione del metallo. Il più delle volte per ottenere un massello ben condensato dal quale partire per la forgiatura di particolari in ferro erano necessari ulteriori riscaldamenti a cui seguivano altrettante fasi di martellatura.

Nell'Europa antica come nell'Africa, l'avvento della metallurgia del ferro è stato un importante fattore di sviluppo sociale con una forte ricaduta sull'agricoltura, perché strumenti metallici come zappe e asce hanno reso molto più facile coltivare la terra e liberarla dalla vegetazione infestante¹⁴, anche consentendo la bonifica di vaste aree malsane e di conseguenza facendo arretrare la piaga della mosca tse-tse, con signifi-

¹³ Gli indizi vanno dalle emissioni del camino, al rumore che perviene dalla camera di combustione, fino al surriscaldamento della parete del forno e forniscono indicazioni al metallurgista per assumere le sue decisioni di aumentare o diminuire l'insufflazione o di aggiungere combustibile dall'alto, nonché di estrarre il blumo.

¹⁴ Chirikure 2015, p.126.

cative ricadute, sia sull'allevamento del bestiame, sia sulla salute pubblica.

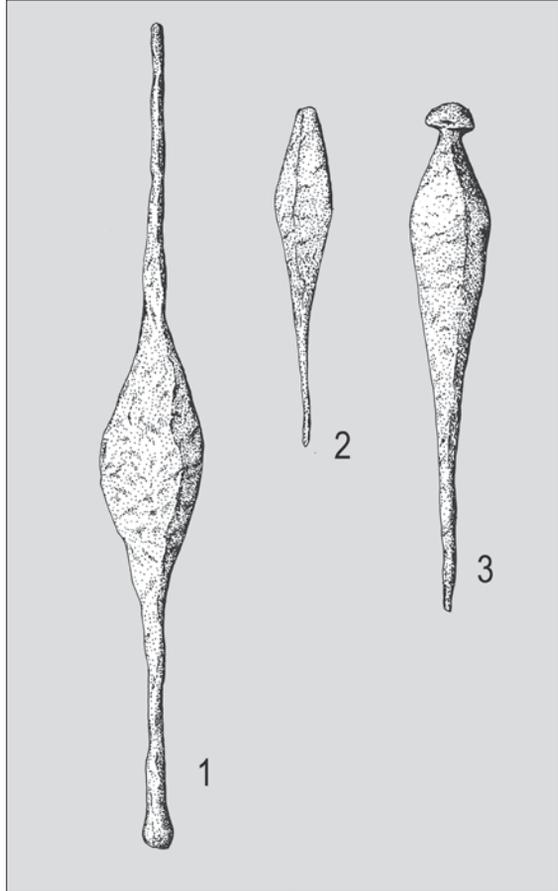
Grazie alla maggiore disponibilità di strumenti in ferro sono state facilitate azioni di disboscamento per la creazione di radure coltivabili e pascoli con la conseguente ricaduta sulla crescita demografica delle comunità di villaggio¹⁵.

Il basso fuoco a camino è la tecnologia portante per le produzioni siderurgiche di tutti i distretti mediterranei ed europei dalla Protostoria fino al pieno Medioevo.

La sofisticazione del processo di produzione nei distretti metallurgici più avanzati, durante i secoli XIV e XV, conduce alla costruzione di un forno meglio strutturato, in solida muratura, talora con il ventre sagomato. Questi nuovi forni, che i tecnici e gli ingegneri rinascimentali definiscono "forni a manica", rappresentano l'evoluzione tecnologica in grado di consentire produzioni maggiori e di qualità superiore. Nonostante la larga diffusione di questo sistema, il basso fuoco a catasta, con poche modificazioni, giunge fino alla fine del Medioevo e, soprattutto nei centri produttivi più piccoli e appartati, in qualche contesto sopravvive fino ai primi secoli del XIX secolo.

Tutti i forni impiegati dalla Protostoria fino al Medioevo operano con il procedimento diretto, ovvero producono direttamente il ferro, mentre i grandi forni a manica tardo-medievali raggiungono temperature interne superiori, conducendo almeno in parte il metallo a fusione, che in presenza di un'abbondante presenza di carbonio genera il carburo di ferro (Fe_3C). Questo composto, in lega con il ferro liquido, produce quella che nei testi rinascimentali è definita "ferraccia", (ovvero ghisa). Questi nuovi sistemi inaugurano il processo indiretto, consistente nella produzione di un metallo con scarse qualità fisico-meccaniche, trasformabile in ferro e acciaio in seguito a un successivo processo metallurgico detto di affinazione, attuato in appositi forni, generalmente a pozzo.

I forni che consentono il procedimento indiretto sono capaci di grandi volumi produt-



Blumi protostorici di ferro derivanti da produzioni al basso fuoco.

1. Spluga (I); 2. e 3 Sarre (F).

¹⁵ Chirikure 2015, p. 127.

tivi e garantiscono un metallo di elevata qualità facilmente trasformabile in acciaio. In base alle dimensioni sono detti altiforni.

Naturalmente la ghisa in piccole quantità si produce anche nei bassi fuochi a camino, soprattutto in quelli di dimensioni considerevoli, come testimonia Pausania¹⁶ nel II secolo d.C., il quale parla di un ferro che si può colare negli stampi per produrre statue. Come già osservato, con ogni probabilità si tratta di piccole quantità che normalmente si perdono con le scorie e soprattutto la qualità è scadente.



Distribuzione delle principali fogge di blumo di ferro relativi alle produzioni hallstattiane e lateniane in Europa.

2.2 I prodotti della riduzione

L'introduzione del ferro nella storia dell'uomo rappresenta una novità rilevante che coincide con lo sviluppo di una tecnologia di lavorazione diversa da quella del rame e del bronzo consolidata sin dal IV millennio a.C. Il rame allo stato metallico puro o quasi puro non venne utilizzato, salvo che nel Calcolitico. La sua lega con lo stagno (il bronzo) ha dato luogo allo sviluppo di un sistema tecnologico molto sofisticato basato sul fatto che questa si presta molto bene a essere colata entro stampi di terra, argilla o pietra. Nel corso del III millennio a.C. i centri metallurgici mediterranei ed europei mettono a punto una tecnologia molto complessa che consente la produzione di manufatti

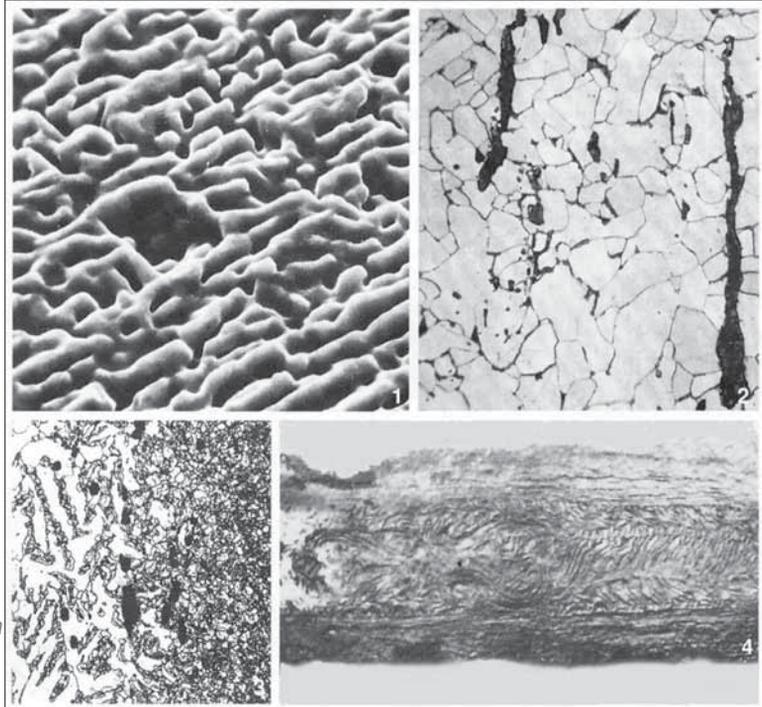
¹⁶ Bromhead 1962, p. 2.

in bronzo di grande pregio.

Il ferro a differenza del bronzo non si presta alla lavorazione per colata entro stampi e quindi l'unico sistema per lavorarlo è la deformazione plastica ottenuta a caldo mediante azione meccanica, particolarmente con la martellatura¹⁷.

Il nuovo metallo subentra con difficoltà al bronzo nello strumentario delle comunità preistoriche soprattutto per le scarse caratteristiche meccaniche e per la maggiore deperibilità dovuta all'ossidazione. La riduzione del minerale nei bassi fuochi a catasta o

1. micrografia al SEM (2400 X), di una sezione di campione di ferro puro prodotto al basso fuoco con struttura spugnosa;
 2. Sezione longitudinale piana di uno spiedo di ferro proveniente da un sito greco (200 X). Le tracce scure sono venature di scoria inglobate nel massello;
 3. Sezione di un'ascia del IV secolo a. C. da Al Mina (Siria), con una matrice di ferro dolce (porzione a sinistra) e una parte superficiale in acciaio al carbonio cementato;
 4. Macrografia di una spada lunga merovingia con l'anima damaschinata e i taglienti riportati per saldatura a caldo.



nelle piccole strutture a camino consente la produzione di pochi chilogrammi di ferro (da 2 a 10) per ogni processo che si realizza in capo a otto - dieci ore.

La presenza, molto diffusa nell'Europa centrale e anche in Spagna, Italia e nell'area danubiana, di masselli bi-piramidali, di varia foggia o lastre allungate, costituiti da un corpo centrale a sezione quadrata con due punte contrapposte, del peso di 2 - 3 Kg e lunghezza normalmente di 15 - 30 cm¹⁸, pare collegarsi alle dimensioni del processo produttivo. Questi manufatti talora scoperti in quantità rilevanti nei ripostigli rappresentano il semilavorato direttamente conseguente il processo di riduzione al basso fuoco. Essi vengono ulteriormente lavorati negli stessi centri di produzione o immessi direttamente sul mercato per essere trattati altrove. I principali rinvenimenti si trovano in Austria, nel Sud della Germania, in Svizzera, in Francia e nel Sud dell'Inghilterra¹⁹.

Il ferro preistorico prodotto con il procedimento diretto nei bassi fuochi è un metallo

¹⁷ Maddin et al. 1978, p. 110.

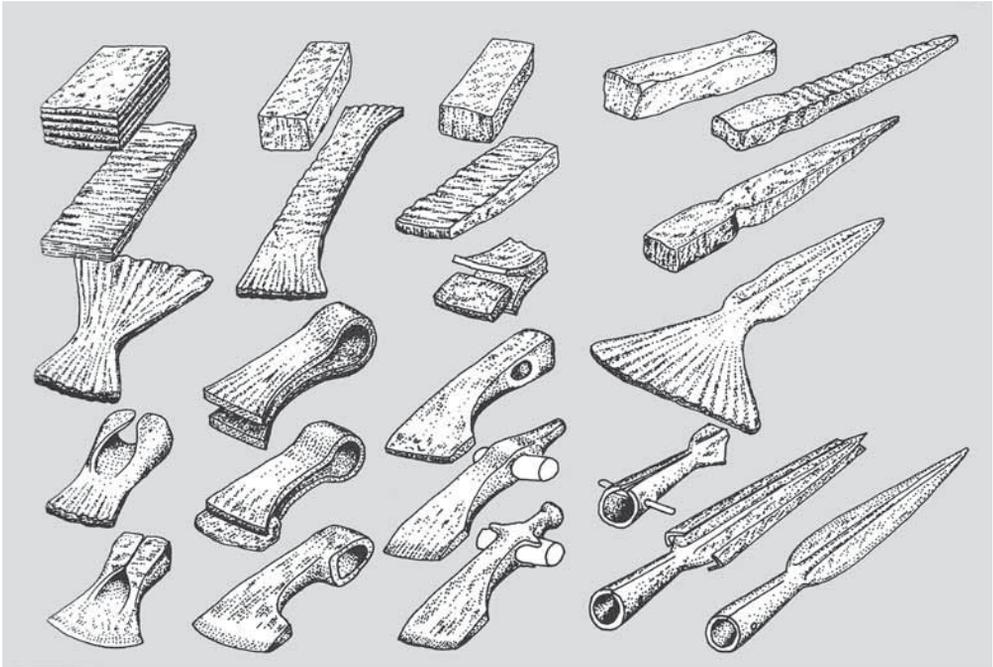
¹⁸ Pauli 1983 2015, p. 282.

¹⁹ Giot et al. 1979, p. 68.

2. La riduzione dei minerali in metallo

semi-dolce di per sé scarsamente adatto alla produzione di armi e strumenti soggetti a sforzi elevati, in quanto complessivamente offre scarse qualità fisico meccaniche.

Un metodo per migliorare la durezza superficiale è la cosiddetta cementazione che si realizza entro crogioli di argilla o addirittura nello stesso basso fuoco, con particolari accorgimenti. Il procedimento, scoperto probabilmente per caso, alle origini avveniva direttamente e in maniera non uniforme durante lo stesso processo di forgiatura²⁰. Nelle fasi più tarde il processo di arricchimento di carbonio superficiale (carburazione) è



Schema di lavorazione per forgiatura a caldo e saldatura di alcuni manufatti correnti nelle produzioni barbariche (da Pleiner ridisegnato).

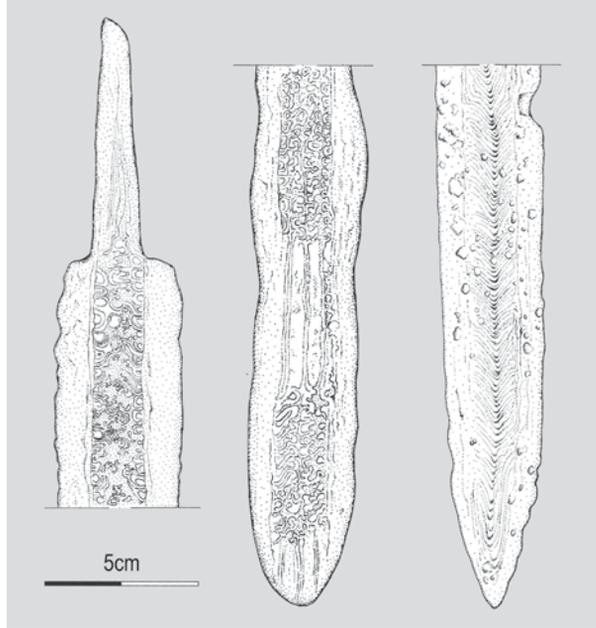
attestato come trattamento separato, attuato dopo la forgiatura del manufatto, a caldo, in ambiente controllato, mediante diffusione atomica entro uno spessore di qualche decimo di millimetro. In questi casi avviene un fenomeno chimico-fisico complesso che corrisponde alla carburazione delle porzioni superficiali del metallo che, seguita da un brusco raffreddamento detto tempra, costituisce il cosiddetto processo di “cementazione”. Questa operazione viene realizzata entro crogioli di terra cotta o altri materiali refrattari, con il manufatto immerso nella polvere di carbone. Qui, in assenza di ossigeno onde evitarne la combustione, vengono riscaldati nel basso fuoco o nel fuoco di forgia in base all’esperienza. La successiva tempra in acqua o olio consente di fissare a temperatura ambiente le strutture cristalline tipiche delle alte temperature, con il risultato del forte indurimento della porzione trattata. In questo modo si ottiene un manufatto con un’anima tenera e flessibile, e la superficie molto dura consentendo la

²⁰ Maddin 1978, p. 112.

produzione di armi e attrezzi particolarmente efficaci.

Manufatti in ferro carburato e temprato sono noti sin dalle origini della metallurgia del ferro. Si ritiene che questo metodo sia stato messo a punto dagli stessi Ittiti sin dal II millennio a.C e abbia seguito la diffusione della siderurgia presso i popoli vicini²¹ con estrema lentezza.

La larga diffusione della metallurgia del ferro pare legata alla scoperta dell'acciaio (lega ferro - carbonio, con percentuale di carbonio compresa tra 0,03 e 1,9%) che, grazie alla tempra, possibile su tutti gli acciai con tenore di carbonio superiore allo 0,3%, lo rende adatto alla costruzione di manufatti d'uso quotidiano e di armi e attrezzi particolarmente tenaci. Con il metodo della carburazione seguita da tempra è possibile produrre dei piccoli pani in acciaio al carbonio, semplicemente cementando delle lamine sufficientemente sottili che vengono saldate per martellatura a caldo a formare un massello con il quale forgiare manufatti con notevoli caratteristiche meccaniche.



Diverse forme di damaschinatura barbarica in spade merovinge i cui trancianti sono stati riportati per saldatura a caldo. (Da Salin ridisegnato).

L'acciaio era noto già nel mondo greco del IV secolo a.C.²² ove, secondo Daimachus, se ne conoscevano tre diverse qualità:

1 - l'acciaio sinopico utilizzato per gli attrezzi da carpenteria; 2 - l'acciaio laconiano impiegato nella costruzione di lime e punte per forare; 3 - l'acciaio della Lidia adatto per la costruzione di spade e armi in genere.

I metallurgisti dell'età del ferro conoscono anche il cosiddetto acciaio naturale ottenuto lavorando del minerale di ferro ricco di manganese e privo di fosforo, arsenico e zolfo, direttamente al basso fuoco. Il risultato è quello di un acciaio assai malleabile, di discrete qualità meccaniche. Secondo Forbes²³ questo procedimento è stato messo a punto dai celti del Norico intorno al V secolo a.C. La scoperta discende direttamente dalla natura del minerale e di conseguenza del giacimento.

L'acciaio del Norico come quello spagnolo²⁴, proveniente dall'area basca e dalle

²¹ Forbes 1972, p. 96.

²² Forbes 1972, p. 218.

²³ Ivi, p. 219.

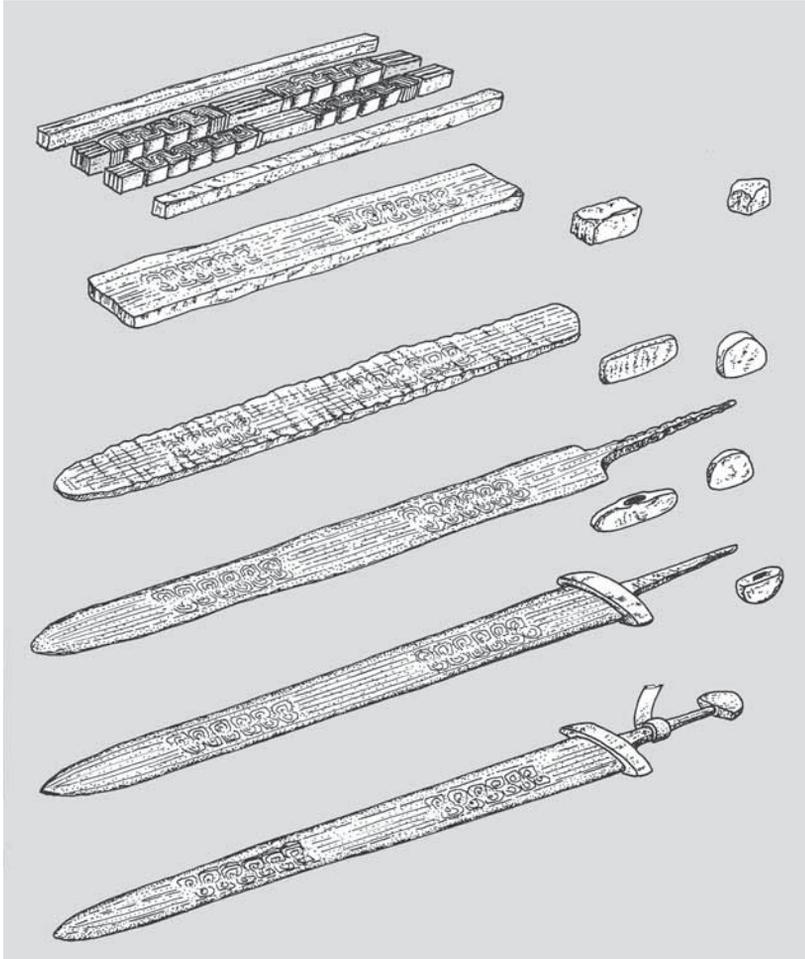
²⁴ Gaio Plinio 1988, p. 219.

2. La riduzione dei minerali in metallo

Asturie era molto apprezzato dai romani.

Sebbene non espressamente citato nei testi è probabile che metodi di produzione dell'acciaio naturale fossero noti nella stessa epoca anche nell'Italia centrale.

Il fosforo, come il carbonio, è un elemento chiave nella produzione dell'acciaio. La sua presenza in tracce favorisce la saldabilità a caldo, ma la sua coesistenza in alligazione con percentuali di carbonio superiori allo 0,03% rende l'acciaio eccessivamente fragile e quindi inadatto alla produzione di armi e utensili. Non a caso i più importanti



Lavorazione di una spada damaschinata per forgiatura ottenuta mediante la giunzione di diverse barrette e pacchi di lamelle di metallo, saldate a caldo per martellatura, riferibile ai primi due rilievi mostrati nella figura della pagina precedente.

La lavorazione richiede lunghe lavorazioni in ferriera per produrre lamine e barrette di acciaio al carbonio per carburazione del metallo prodotto al basso fuoco. Successivamente si procede con riscaldamento alla forgia al colore rosso (circa 1000°C), seguita da prolungate martellature.

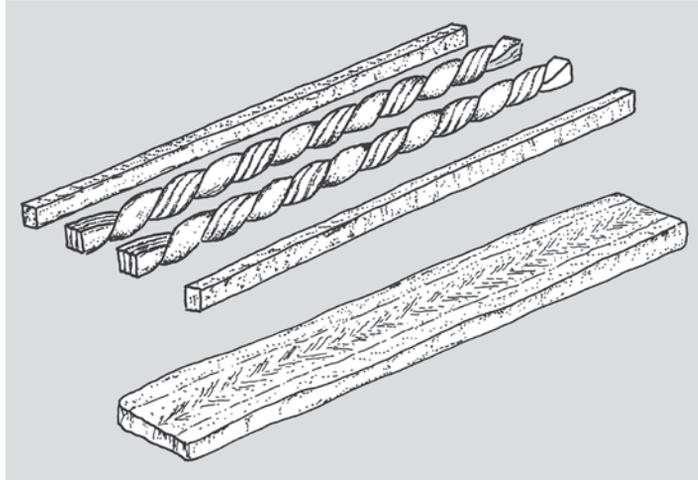
distretti produttori di acciaio dell'Antichità insistono su bacini minerali dove è attestata l'assenza pressoché generalizzata del fosforo, ancorché in tracce.

Un altro metodo per produrre l'acciaio è quello della fusione in un crogiolo secondo il metodo indiano del distretto di Hyderabad, dove si produceva il cosiddetto acciaio wootz mediante la riduzione dell'ematite nera in un crogiolo di argilla con carbone di bambù e fronde di particolari alberi. Quando il metallo incominciava a fondere scendendo sul fondo del crogiolo, si procedeva a ripetute colate entro formelle di 5 pollici

di diametro e 1/2 pollice di spessore. Questo acciaio di ottima qualità, probabilmente è quello già noto ai romani come “ferro serico”, adatto per i lavori di damaschinatura²⁵.

Nel corso del Medioevo, grazie all’espansione islamica, l’acciaio wootz viene diffuso nel bacino del Mediterraneo e centri quali Damasco e Toledo divengono sedi di un’importante industria spadaria dove si producono le lame in acciaio cosiddetto damaschinato più famose del mondo. Questo particolare effetto superficiale, sfruttato per offrire un migliore aspetto estetico e una maggiore flessibilità della lama, nel caso dell’acciaio di wootz, è dovuto al flusso plastico del metallo in due o più direzioni, sotto i colpi di martello, favorito dalla presenza di piccole particelle di cementite globulare²⁶.

Anche i persiani conoscevano assai bene i metodi per la produzione di acciaio al crogiolo, con un procedimento del tutto analogo a quello indiano, forse con l’unica variante delle essenze



Schema di lavorazione del massello destinato alla produzione di una spada damaschinata a tegoli analoga a quella di cui al terzo rilievo mostrato a p. 33.

impiegate. Questo acciaio, noto ai romani come “ferro partico”, nell’opinione di Plinio il Vecchio, è secondo soltanto a quello “serico”²⁷.

A partire dal I secolo d.C. nell’area celtica compare una qualità di acciaio ottenuta per saldatura mediante martellatura a caldo di bande, lamine o verghe che, nella forgiatura dei manufatti, offre un aspetto simile alla damaschinatura²⁸. Questa tecnica trova larga diffusione a partire dal II - III secolo d.C. presso le popolazioni germaniche dell’Europa continentale ma materiali analoghi sono noti ad Atene sin dal V secolo a.C., come attestano alcuni morsetti studiati in occasione del restauro dell’Eretteo²⁹. La necessità del lungo e complicato processo di saldatura delle verghe forgiate separatamente discende dall’impossibilità, date le tecniche disponibili, di produrre masselli di acciaio sufficienti a consentire la forgiatura di un manufatto duro e tenace in un unico blocco.

L’acciaio saldato viene più tardi impiegato diffusamente nell’area culturale franca per produrre lame e asce da battaglia di ottima qualità³⁰. Solitamente i metallurgisti franchi

²⁵ Forbes 1972, p. 218.

²⁶ Ivi.

²⁷ Gaio Plinio 1988, p. 210.

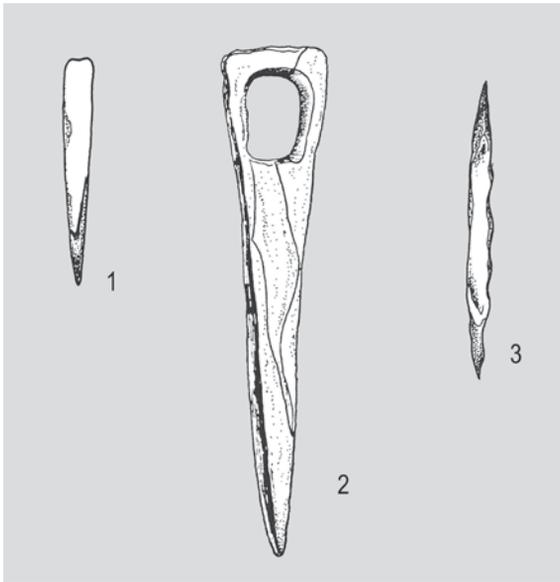
²⁸ Salin 1955, p. 210.

²⁹ Conophagos, Papadimitiu 1986, p. 132.

³⁰ Salin 1957, p. 13.

2. La riduzione dei minerali in metallo

impiegano diversi tipi di materiale per le singole parti del manufatto saldandole a caldo. Per il tagliente si impiega acciaio carburato adatto alla tempra, mentre per le parti portanti è sufficiente il ferro quasi puro derivante dalla riduzione nei bassi fuochi. Gli effetti estetici tipo damaschinatura, nella metallurgia barbara vengono ottenuti mediante saldatura a caldo di lamine di metallo dalle caratteristiche differenti, tirate a verghe e opportunamente ripiegate, contorte e saldate. Il risultato è un manufatto molto elastico e tenace con una buona finitura superficiale di notevole aspetto estetico. Il ferro saldato



Sezioni di strumenti prodotti con la tecnica della saldatura a caldo di piastre e blocchetti di diversa natura.

A. Sezione trasversale di scramasax in cui si distingue il tranciante in ferro carburato;

B. Ascia da battaglia formata dalla saldatura di tre piastre carburate in maniera differente al fine di ottenere elasticità nella struttura e durezza nel tagliente;

C. Sezione trasversale di spada lunga con anima ferritica, superfici e trancianti in ferro carburato.

viene prodotto largamente durante il Medioevo e rappresenta la materia prima con la quale operano i numerosi fabbri ferrai e spadari.

Con le grandi invasioni di origine orientale provenienti dal Caucaso e dall'Altai arriva in Europa la tecnica dell'acciaio ricotto. Questa consiste nella produzione di un massello al basso fuoco con successive ricarburazioni per ricottura e martellature a caldo prolungate e in sequenza che favoriscono la saldatura delle diverse parti e il rimescolamento di porzioni di metallo carburato con parti di ferro quasi puro. Ne consegue un massello piuttosto disomogeneo che offre una mescolanza di metallo dalle caratteristiche differenti nelle diverse parti ma nel complesso in grado di offrire caratteristiche meccaniche di durezza e resilienza rilevanti e in grado di consentire la

produzione di manufatti piuttosto tenaci³¹.

Sullo stesso principio della saldatura per martellatura eseguita a caldo si basa la tecnica dell'agemina mediante la quale gli artigiani barbari producono manufatti in ferro di eccezionale fattura. Il procedimento consiste nella forgiatura del manufatto e nell'incisione, sulle superfici di questo, di complicati disegni successivamente riempite con lamine di metallo prezioso (oro, argento o più raramente ottone), saldate a freddo mediante martellatura. Il risultato è una superficie policroma di eccezionale effetto estetico.

Accanto ai prodotti di qualità fabbricati con complicati processi e trattamenti, si registra un'infinità di manufatti di uso quotidiano che non richiedono lavorazioni sofisticate.

³¹ Lombard 1974, p. 91.

Questi lentamente si diffondono anche presso i semplici contesti di villaggio alimentando un mercato capillare del ferro. Tra questi, sin dall'età romana, si segnalano i chiodi che accompagnano indistintamente gli insediamenti rurali e quelli signorili, oltre a diversi attrezzi agricoli come le falci, le roncole, ecc. Un semplicissimo manufatto come il chiodo, molto diffuso già in antico, in una certa misura sembra prodotto in maniera standardizzata. La testimonianza pare derivare da Inchtuthil in Scozia dove nel 1960 venne scoperto un ripostiglio con un ingente quantitativo di chiodi di varie misu-



Scramasax in ferro forgiato con evidenti tracce di damaschinatura dal sito barbarico di Belmonte (Torino), datato al VII - VIII secolo d.C.

(A lato) Particolari in ferro ageminato in argento e ottone, consistenti in una fibbia, diversi puntali di cintura e una borchia; accessori tipici di un guerriero longobardo. Da una tomba della necropoli di Collegno (Torino), datati VII secolo d.C.



re, perfettamente conservati. Si tratta quasi certamente di mate-

riali legati alle fortificazioni romane la cui costruzione iniziò nel 83 d.C. Nel complesso di reperti è stato possibile individuare sei classi dimensionali che vanno da 34 mm di lunghezza e 5 g di peso, fino a 305 mm di lunghezza e 260 g di peso³².

Con la diffusione dell'Altoforno nel corso del Rinascimento, il ferro saldato e quello più grezzo al basso fuoco a catasta risulta ancora impiegato per la produzione di manufatti di minore importanza, che non richiedano rilevanti caratteristiche meccaniche, garantendo costi inferiori³³.

Il grande complesso di conoscenze tecnologiche che caratterizza l'artigianato del ferro, nei secoli della Protostoria e nell'alto Medioevo attribuisce alle figure dei metallurgisti e dei fabbri ruoli sociali rilevanti. Informazioni in merito derivano, sia dell'archeologia, sia dalla documentazione storica e in particolare dal mondo germanico che in una certa misura rappresenta l'ambiente culturale che meglio custodisce le tradizioni dell'età del Ferro. Dati interessanti derivano dagli scavi delle necropoli longobarde e franche, poiché questi popoli, ancorché convertiti al cristianesimo, tardano ad abban-

³² Pauli 1974, p. 52.

³³ Perucca 1968, p. 107.

2. La riduzione dei minerali in metallo

donare le tradizioni pagane di seppellire i morti con un ricchi corredi di oggetti tra i quali attrezzi da fabbro, come pinze e martelli, ma il più delle volte questi oggetti accompagnano una ricca dotazione di armi e accessori dell'abbigliamento attribuibili agli uomini di rango e ai guerrieri, come *spathe*, *scramasax*, umboni di scudo e puntali di cintura ageminati, confermando l'elevato livello sociale dei fabbri³⁴.

Anche la mitologia nordica supporta questa tesi, evidente soprattutto nella "Saga di Egill", che narra le gesta dell'eroe norreno (ovvero germanico-scandinavo), Skallagrímur, vissuto tra IX e X secolo³⁵, definito "berserkr", cioè guerriero e fabbro. Il componimento appare significativo per chiarire usi e costumi dei germani del Nord Europa, culla della cultura che ebbe un grande ruolo nella formazione dell'Europa medievale. La saga informa anche della stretta integrazione dell'attività metallurgica con le attività rustiche, specificando come l'inverno fosse la stagione propizia per la lavorazione dei metalli. Fatto questo, ancora ripreso dalle tradizioni tardo-medievali e riportato negli statuti di



Scrigno di Franks (London, British Museum). Opera in osso di balena istoriato e iscritto dalla Northumbria datato ai primi anni del secolo VIII. L'esterno è istoriato a bassorilievo con riquadri a carattere storico e mitologico. Quello frontale di sinistra è dedicato al fabbro Weland mostrato nella sua fucina. A destra, in una sorta di flashback, sono rappresentate le oche che hanno mangiato la limatura di ferro e deposto i preziosi escrementi. Nella scena principale il fabbro tiene un ferro sull'incudine con le tenaglie mentre offre da bere al re Nidud di Svezia che lo ha fatto prigioniero e reso zoppo. Egli porge una coppa ricavata dal cranio di uno dei suoi due figli sui quali si è vendicato uccidendoli (un cadavere è mostrato a terra). Subito dopo violerà la figlia del re lasciandola incinta e fuggirà in volo con le ali che si è segretamente costruito.

lagrimr, vissuto tra IX e X secolo³⁵, definito "berserkr", cioè guerriero e fabbro. Il componimento appare significativo per chiarire usi e costumi dei germani del Nord Europa, culla della cultura che ebbe un grande ruolo nella formazione dell'Europa medievale. La saga informa anche della stretta integrazione dell'attività metallurgica con le attività rustiche, specificando come l'inverno fosse la stagione propizia per la lavorazione dei metalli. Fatto questo, ancora ripreso dalle tradizioni tardo-medievali e riportato negli statuti di

molte comunità minerarie. Secondo il mito, Skallagrímur era un fabbro impareggiabile; durante l'inverno forgiava numerosi oggetti in metallo, poiché aveva fatto costruire una fucina in prossimità del mare in un luogo chiamato Raufanes, per sfruttare il carbone prodotto nelle foreste lontane da Borg. E non riuscendo a reperire una pietra dura e levigata, adatta a battere il ferro, si tuffò dall'imbarcazione immergendosi nelle onde, dalle quali riaffiorò recando una pietra che caricò sulla barca e da allora in poi su quella pietra batté il ferro. Stando alla saga, la pietra è ancora là, circondata da scorie ferrose e sulla sua superficie si notano i segni del martello. Interessante appare anche il racconto della morte di Skallagrímur, avvenuta nel 946, e soprattutto le modalità della sepoltura³⁶: «Egill fece innalzare un tumulo... dove venne deposto Skallagrímur, insieme

³⁴ Si cita ad esempio la tomba longobarda di Centallo (Cuneo), dove un uomo dall'età di 45-50 anni venne deposto all'interno della chiesa di Santa Maria ad Nives con un corredo formato da armi e attrezzi da fabbro.

³⁵ Battaglia 2006, p. 151 e Einarsson 2003, p. 42.

³⁶ Micheletto 2004, p. 351.

al suo cavallo, alle sue armi, ai suoi attrezzi da fabbro ».

Ancor più suggestiva appare la *Wēland der Schmidt*, ovvero la saga germanica delle origini tramandata nella versione antico-nordica dell'Edda³⁷ col titolo di “Canto di *Wēland*” (o “*Völundr*”). Verosimilmente la saga si formò in ambiente sassone nel corso del V secolo d.C. all'atto dello stanziamento nelle terre di Britannia³⁸ e fu ripreso nel principale poema epico anglosassone *Beowulff*, tramandato in forma orale e trascritto in una variante sassone occidentale (o inglese antico) nel VII secolo³⁹. Qui, l'abilità ammantata di magia del fabbro *Wēland* è oggetto di una singolare descrizione:

« Wēland tornò alla fucina, scelse una lima e ridusse la spada in fine limatura che mescolò poi a farina. Fece poi digiunare per tre giorni degli uccelli addomesticati e dette loro quel miscuglio da mangiare. Mise quindi nel forno gli escrementi degli uccelli, portò a fusione in modo da depurare il ferro da ogni scoria, e con il metallo così ottenuto forgiò una nuova spada ».



Bottega del fabbro su una tavola del portale della chiesa di Hylestad in Aust Agder, Norvegia, XII-XIII secolo.

Quello descritto dalla saga è un processo empirico di carburazione del ferro per produrre acciaio al carbonio. Agli occhi di un profano l'uso dello sterco d'oca nella lavorazione può suggerire una pratica di magia ma in realtà ha una precisa motivazione chimico-fisica. Gli escrementi degli uccelli sono ricchi di azoto, un metalloide fondamentale nel processo poiché favorisce l'alligazione ferro carbonio a temperature inferiori rispetto a quella di fusione e la saldatura a caldo mediante martellatura. In questo modo, agglutinando a caldo (intorno a 1.000°C) la limatura di ferro contenuta nel guano si producono piccole quantità di acciaio, fondamentali nel processo di saldatura per la damaschinatura⁴⁰. Queste tradizioni e costumi apparentemente lontani non devono stupire poiché derivano dalla koiné alto germanica, ovvero dalla matrice del popolamento medievale dell'Europa continentale.

Dal processo di produzione del ferro saldato, nel XVII - XVIII secolo si giunge alla produzione del ferro cosiddetto pudellato o “puddler” ottenuto dalla ghisa liquida fatta permanere in un apposito forno a camera mantenuto in regime ossidante al fine di eliminare il carbonio e le tracce di silicio solitamente presenti abbassandone il tenore

³⁷ La Salvia 2010, p. 17.

³⁸ Mackley 2012, p. 3.

³⁹ Seamus 2000, p. 33.

⁴⁰ I puristi indicano come tecnica di “damaschinatura” unicamente quella messa a punto dagli artigiani medio-orientali che operano con acciaio prodotto al crogiolo. In linea con la maggior parte degli studiosi europei in questo testo indico con lo stesso termine anche le lame e gli altri oggetti realizzati dai fabbri europei mediante tecniche di origine barbarica basate sulla saldatura a caldo di lamine carburate con altre di ferro quasi puro.

2. La riduzione dei minerali in metallo

nella lega. Il risultato è quello di una massa spugnosa che necessita di essere condensata al maglio. Ne consegue un metallo di modeste qualità meccaniche⁴¹, molto diffuso in tutte le applicazioni correnti.

Nel bacino del Mediterraneo non risulta conosciuto il procedimento indiretto, tipico dell'altoforno, prima del tardo Medioevo anche se - come già osservato - Pausania riferisce che Teodoro di Samo⁴² nel IV secolo a.C. inventa il ferro da colare (ovvero una sorta di ghisa) e con questo produce delle statue. Dato lo stato di conoscenza delle tecnologie metallurgiche nella Grecia antica è più probabile che si tratti delle piccole quantità di ghisa presenti quale sottoprodotto nel procedimento al basso fuoco, ma si esclude l'impiego consapevole del procedimento indiretto.

Il risultato della riduzione dei minerali con il processo indiretto è, come già visto, la ghisa o ferraccia, solitamente del tipo grigio. Chimicamente si tratta di una lega ferro carbonio con cristalli formati da molecole di ferro, di carbonio e di carburo di ferro (cementite). La percentuale di carbonio, nelle diverse forme, è compresa tra il 2% e il 6% ma in generale non eccedente il 4,5%⁴³.

Il processo indiretto viene attuato in maniera diffusa a partire dal tardo Medioevo in diversi distretti europei. Uno dei più evoluti che adotta un forno a manica molto alto, dalle caratteristiche dell'altoforno, è quello Bresciano-Bergamasco con una struttura chiamata "cannecchio". Nei canneccchi viene fuso l'ottimo minerale proveniente dalle miniere delle valli Trompia, Sclave, Seriana e Brembana. La ghisa in pani prodotta viene rifiuta nei "fuochi grossi" e decarburata per combustione parziale del carbonio di alligazione presente sotto forma di grafite⁴⁴.

La fusione della ghisa prodotta con il procedimento indiretto è più agevole di quella dei minerali di ferro per il fatto che questa fonde a temperatura notevolmente inferiore ai circa 1536°C a cui giunge a fusione il ferro puro. Solitamente una ghisa con un tenore di carbonio superiore al 3% fonde a temperatura inferiore a 1.300°C e qualora la concentrazione di carbonio sia quella dell'eutettico (4,5%), la temperatura di fusione si abbassa a 1135°C⁴⁵. Il risultato dell'affinazione della ghisa grigia è un acciaio a basso tenore di carbonio, tenace e discretamente duttile, particolarmente adatto per lavori di forgiatura di qualsiasi natura. Sulla base dei dati disponibili risulta che con questo metallo vengano prodotte indifferentemente armi da taglio e da punta, armature e canne da fuoco, oltre naturalmente ai diversi attrezzi per l'agricoltura.

⁴¹ Perucca 1968, p. 107.

⁴² Forbes 1972, p. 216.

⁴³ Perucca 1968, p. 915. Solitamente il tenore di carbonio della ghisa prodotta dai canneccchi non supera il 4,5%.

⁴⁴ Perucca 1979, p. 107.

⁴⁵ Ivi.

3. NOTE DI STORIA DELLA SIDERURGIA

3.1 L'origine pre- e protostorica

Manufatti in ferro sono noti sin dal III millennio a.C., come testimoniano numerosi ritrovamenti mediorientali tra Anatolia, Egitto e Mesopotamia. Le indagini chimico-fisiche su alcuni di questi reperti hanno dimostrato trattarsi di metallo meteorico o tellurico, raccolto in natura e lavorato plasticamente, ma non prodotto per via metallurgica¹. Tra i vari manufatti di questo tipo spicca il pugnale in oro con lama in ferro di Alaca Höyük, datato alla seconda metà del III millennio a.C.². Più tardi, nel corso del II millennio a.C. compaiono sporadicamente oggetti in ferro accanto a quelli in bronzo, ma la loro frequenza è molto bassa. Analogamente, nel corso della prima metà del II millennio a.C. ornamenti e armi cerimoniali in ferro sono occasionalmente presenti nello strumentario dei montanari armeni³. La produzione non risulta sistematica e la diffusione del nuovo metallo è estremamente limitata.

La metallurgia del ferro nell'area mediorientale compare in diversi contesti tra la fine del XII e l'inizio del XI secolo a.C. in seguito allo sfaldamento dell'Impero ittita. Localmente emergono le prime testimonianze di sistemi termotecnici per la riduzione di ematiti e magnetiti presenti in diversi giacimenti nelle stesse aree minerarie dove già venivano sfruttati da secoli i giacimenti di solfati misti di rame⁴, e per molto tempo i metallurgisti sembrano produrre indifferentemente manufatti in bronzo e in ferro forgiato. Questo fatto, accompagnato dall'instabilità dell'intera regione e da sconvolgimenti economici di vasta portata⁵, rappresenta il reale inizio dell'età del Ferro⁶, quantomeno nelle regioni del Mediterraneo orientale. Nel corso del XI secolo a.C. attività siderurgiche compaiono in Anatolia e a seguire in Mesopotamia, Egitto, Iran, Caucasia, Transcaucasia (Kuban), Cipro e Creta. È forse interpretabile con la stessa dinamica di diffusione per via di mare l'insediamento produttivo scoperto



Il pugnale ittita con impugnatura in oro e lama in ferro. Analogamente in oro sono le guarnizioni e il puntale del fodero da Alaca Höyük (Anatolia).

¹ Gille 1969, p. 283.

² Nakai et al. 2012, p. 322. Le indagini spettrometriche sull'ammassi di ossidi di ferro della lama hanno evidenziato una percentuale elevata di nickel ben superiore a quella normalmente presente nel ferro prodotto per via metallurgica. Per questa ragione si propende per l'origine meteorica.

³ Forbes 1981, p. 601.

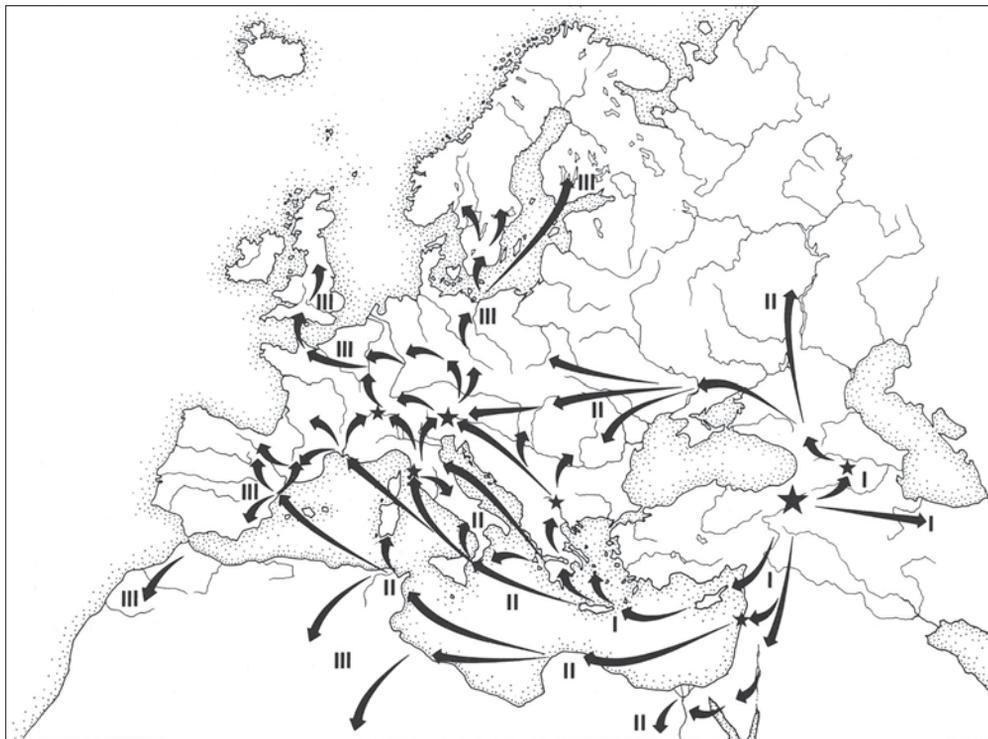
⁴ Eshel 2023, P. 45 e Yahalom-Mack N., Eliyahu-Behar A., 2015, p. 287.

⁵ Come ad esempio un notevole aumento del prezzo del grano.

⁶ Forbes 1981, p. 601.

nell'Italia meridionale presso Manfredonia e datato alla fine del secolo XI a.C.⁷.

Le tecniche di riduzione dei minerali di ferro si diffondono in maniera significativa, al di fuori del Medio Oriente tra X e IX secolo a.C. unitamente all'egemonia marittima dei Filistei. La tecnologia metallurgica è simile a quella del rame, ben nota in tutto il continente. Essa consiste in un processo che prevede un preventivo arrostitimento e il successivo trattamento in un focolare a catasta, variamente protetto, alimentato a carbone di legna. In questo modo si riducono gli ossidi di ferro e si ottiene una massa



Linee di diffusione della metallurgia del ferro dall'area anatolica al Mediterraneo e all'Europa continentale. Fase I - fine XII - XI secolo a.C.; Fase II - X-IX secolo a.C.; Fase III Ultimi secoli del VI-IV secolo a.C.

di metallo quasi puro, con struttura spugnosa e scarse proprietà meccaniche. Ulteriori riscaldamenti al carbone di legna necessari per il processo di condensazione e forgiatura dei manufatti, sin dalle fasi più antiche, consentono la produzione di un ferro carburato che in qualche misura deve aver interessato gli antichi metallurgisti i quali probabilmente scoprirono abbastanza presto anche il processo di tempra, attuabile con un semplice raffreddamento brusco e capace di attribuire notevole durezza superficiale a un metallo dalle caratteristiche meccaniche piuttosto modeste⁸.

Verso la fine del XIII secolo a.C. armi e utensili in ferro compaiono nel mondo greco del periodo protogeometrico e successivamente anche nell'Italia centro-meridionale⁹,

⁷ Forbes 1972, p. 229.

⁸ Maddin 1978, p. 110.

⁹ Giardino 2003, p. 497.

ma non risulta che siano presenti anche attività produttive, è più probabile che singoli manufatti derivino dal commercio con la vicina Anatolia. Attività metallotecniche di scarsa entità nella penisola ellenica si registrano soltanto in seguito all'invasione dorica, a partire dalla fine del secolo XI, quando compaiono le prime manifestazioni produttive nel Mediterraneo centrale. Relativamente alla penisola italica, verso la fine del II millennio sono note attività metallotecniche del ferro nei pressi di Bologna, in Sardegna e in prossimità delle coste dell'Etruria, dove le più antiche evidenze sono accertate a partire dal X secolo nell'area massetana e nei secoli IX e VIII, a opera degli Umbri¹⁰, trovano grande diffusione nell'interno della penisola. Rapidamente l'area produttiva centro-italica assume rilevanza nell'intero bacino mediterraneo, al punto che nei quasi quattro secoli compresi tra VIII e V a.C., si stima una produzione di 10.000 t di ferro all'anno, con uno smercio in tutti i principali mercati mediterranei¹¹. Le evidenze archeologiche riportano a una tecnologia piuttosto evoluta, incentrata sul basso fuoco a camino ben documentato anche nella tradizione pittorica¹², con diverse varianti dimensionali.



Suolo di un atelier metallurgico dell'inizio del I millennio a.C. con resti di un crogiolo fittile, un ammasso di scorie di ferro e frammenti di vasi al sito mediorientale di Tell es-Safi/Gath (Israele), dove risultano attività di riduzione di minerali di rame e ferro. (Da Eliyahu-Behara et al., 2012).

Nel VIII - VII secolo a.C. atelier siderurgici sono attivi in diversi distretti produttivi della penisola ellenica, operanti con il procedimento diretto¹³ e sembra che alcune nozioni sui trattamenti termici fossero già note, tra le quali in particolare la cementazione e la tempra¹⁴.

Un'importante linea di diffusione delle tecniche siderurgiche messe a punto in Medio Oriente interessa il corso del Danubio, attraverso il quale la siderurgia penetra nel continente fino a raggiungere la Stiria e la Carinzia (Noricum) nelle Alpi Orientali tra la fine del XI e l'inizio del X secolo a.C.¹⁵. Questo polo produttivo, noto anche in epoca romana, sviluppa una tecnologia molto sofisticata che comprende la produzione di acciaio e l'impiego dei trattamenti termici. Esso diffonde a sua volta conoscenze metallotecniche all'interno dell'arco alpino e a Nord, presso le tribù germaniche, ove la metallurgia del ferro è attestata a partire dal secolo VIII a.C. A Nord delle Alpi, nell'area culturale riferibile all'immenso areale La Tène, sin dal VII - VI secolo a.C. sono attivi i poli minerari

¹⁰ Grant 1982, p. 25 e Forbes 1981, p. 605.

¹¹ Ivi e De Santis et al. 2019, relativamente all'area produttiva di VII secolo a.C. scoperta al foro di Cesare (Roma).

¹² Ivi e Plainer 1969, p. 33.

¹³ Ivi.

¹⁴ Plainer 1969, p. 33. V. oltre p. 43.

¹⁵ Tylecote 1987, p. 177.

3. Note di storia della siderurgia

metallurgici a Bibracte (Saone et Loire - Francia)¹⁶, nel Giura Vodese (Svizzera)¹⁷ e nell'area di Salzberg (Austria). In queste aree sono noti significativi impianti produttivi, tutti incentrati sulla tecnologia del basso fuoco a camino.

Nella seconda metà del I millennio a.C. è attivo un polo produttivo in Spagna, nell'area basca (Bilbao e Asturie), forse indotto dall'area culturale centroitalica, probabilmente con influenze fenicie derivanti dal Sud della penisola e soprattutto dal Nord Africa. Un'altra presenza è attestata a Toscanos presso Malaga¹⁸.



Kylix greca a figure rosse cosiddetta "della fonderia", prodotta dai ceramisti e scultori Efaisto e Teti, datata all'intervallo 490 - 480 a.C.

Verso il V secolo a.C. la metallurgia del ferro raggiunge la Bretagna e le isole britanniche, grazie alla migrazione dei celti dal continente verso Nord-Ovest¹⁹. In tutti questi contesti gli scavi hanno posto in luce complessi produttivi formati da batterie di forni a camino con la base infossata del diametro approssimativo alla base di circa 60 - 80 cm e talora maggiori.

3.2 Il ferro nella Grecia antica

La produzione siderurgica dell'antica Grecia è documentata in diversi scritti, come nel caso dell'importante testo di Ippocrate, dove si menzionano le fasi di produzione del ferro misto a scorie e la rimozione delle stesse mediante martellatura, per produrre ferro denso e compatto²⁰. Secoli più tardi Hesychios nel suo dizionario suggerisce che il terzo riscaldamento del ferro sia compito del fabbro, il quale subentra ad altri due stadi di riscaldamento²¹, con ogni evidenza riferibili alla produzione metallurgica mediante riduzione del minerale in metallo. Anche la produzione dell'acciaio mediante cementazione è probabilmente oggetto di un testo di Plutarco il quale parla di un vaso, dove i fabbri formano una lega di ferro, con ogni evidenza alludendo al processo di cementazione, consistente nella formazione di una lega ferro-carbonio nello strato superficiale dei manufatti in ferro forgiato che avviene riscaldando l'oggetto entro un ambiente ana-

¹⁶ Dechelette 1914, p. 1543.

¹⁷ Pelet 1971, p. 12.

¹⁸ Keesmann 1989, p. 99 e Tylecote 1987, p. 162.

¹⁹ Ivi.

²⁰ Papadimitriou 1982, p. 366.

²¹ Con ogni evidenza le fasi precedenti sarebbero quelle citate da Ippocrate, ovvero la riduzione del ferro e l'eliminazione delle scorie, operazioni che avvengono nella ferriera, mentre la sagomatura (forgiatura) spetta al fabbro.

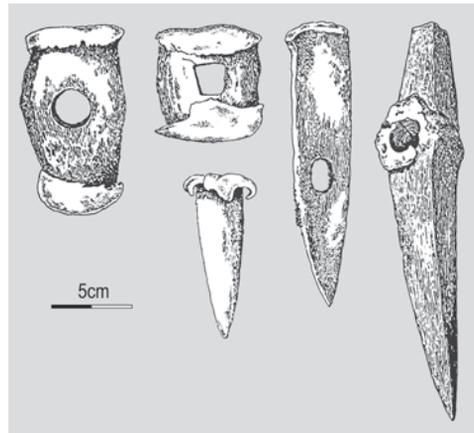
erobico, come un crogiolo sigillato in presenza di polvere di carbone. Successivamente questi prodotti venivano temprati con un brusco raffreddamento al fine di indurire le parti cementate. Con ogni probabilità nella Grecia antica i metallurgisti conoscevano anche il processo di ricottura onde eliminare o quantomeno ridurre le cricature che il processo di cementazione e tempra induceva sui manufatti.

Lo studio metallografico su diversi particolari in ferro come morsetti a doppia "T" e segmenti lineari estratti durante i lavori di restauro dell'Eretteo nell'acropoli di Atene



Vaso a vernice nera da Vulci (fine VI secolo a.C.) raffigurante l'ambiente di una ferriera con il forno a manica analogo a quelli studiati dagli etnologi in Africa.

(A lato) Attrezzi da minatore (mazze, cunei e picconi) da siti della Grecia Antica (da Plainer 1969).



ha prodotto importanti risultati. I manufatti, impiegati nel bloccaggio di grandi conci di marmo con la sigillatura mediante colate di piombo, sono databili al V secolo a.C.²² Le indagini hanno dimostrato che ad eccezione di un solo elemento di ferro quasi puro, gli altri erano prodotti saldando a caldo mediante

martellatura lamine di acciaio al carbonio alternate ad altre di ferro quasi puro, ognuna dello spessore da 2 a 3 mm, con ripiegature e successive sequenze di martellatura a caldo al fine di attribuire tenacia e durezza. L'esame spettrometrico ha dimostrato che gli strati di acciaio contenevano percentuali di carbonio variabili tra lo 0,1 e lo 0,6% in peso, con punte fino al 1%. L'esame al microscopio elettronico a scansione ha altresì

²² Conophagos, Papadimitiu, 1986, p. 132.

dimostrato che l'acciaio conteneva, sia strutture dendritiche aghiformi, sia globulari di cementite. Questi dati dimostrano che nel V secolo a.C. i greci conoscevano la tecnica della damaschinatura ed erano in grado di produrre manufatti flessibili, tenaci e molto duri superficialmente. Nelle indagini si è anche scoperto che i reperti esaminati contenevano circa 0,05 - 0,10% in peso di nichel, circa lo 0,06% in peso di rame e alcune tracce di zinco e piombo oltre a totale assenza di manganese e silicio, suggerendo che fossero stati prodotti con il minerale proveniente dal centro minerario metallurgico di



Forno a camino con le strutture dei mantici a membrana con doppia camera, nella fotografia scattata dall'esploratore Eugène Lenfant nel 1902 in Camerun, dove si vedono l'apertura di scarico e le strutture di supporto della copertura. La similitudine di questo forno con quelli di VI - V secolo a.C. mostrati alle pagine precedenti è significativa.

Laurion, noto per le miniere di argento ma indubbiamente sfruttato anche per l'estrazione dei minerali di ferro.

L'ambiente culturale greco, oltre ai riferimenti scritti alla metallurgia, ha fornito significative immagini di bassi fuochi a camino. La più interessante è mostrata in un ambiente metallurgico destinato alla produzione di rame per la fusione di statue in bronzo ed è riportata nella *kylix* attica a figure rosse, datata 490 - 480 a.C.

Come appare del tutto scontato, le competenze tecniche maturate nella madrepatria sono condivise in Magna Grecia e presso i popoli confinanti, dove troviamo riscontri analoghi nelle notevoli produzioni ceramiche etrusche, come nel caso del vaso a figure nere da Vulci (Viterbo), datato alla fine del VI secolo a.C. (conservato al British Museum), dove si vede un metallurgista estrarre il blumo da un basso fuoco a camino. In questo caso la raffigurazione riguarda un atelier

metallurgico del ferro²³. Il metallurgista più anziano è seduto su uno sgabello accanto al forno e sta estraendo il blumo con lunghe tenaglie, mentre l'aiutante, in piedi, impugna un grande martello a manico lungo (o mazza) ed è pronto a condensarlo martellandolo all'incudine per ottenere il massello semilavorato. A tergo del forno sul livello del terreno si notano le camere tondeggianti dei mantici a membrana e intorno alla figura principale gli attrezzi fondamentali per l'attività produttiva, come le tenaglie, le mazze e grandi martelli. I bassi fuochi a camino raffigurati nei vasi etruschi e greci sono

²³ Questi documenti sembrano dimostrare che in questa fase i bassi fuochi a camino fossero impiegati indifferentemente nella metallurgia del rame e in quella del ferro, anche se i primi forse avevano dimensioni più contenute.

singolarmente simili a quelli documentati nel 1902 con una fotografia dall'esploratore francese Eugène Lenfant presso la comunità africana Baya M'Bakas in Camerun dove oltre alla struttura del forno sono esposti due mantici a membrana con doppia camera, che potrebbero essere indifferentemente in legno o terracotta. Strutture analoghe sono state documentate da archeologi ed etnologi in molti ambienti siderurgici africani e in qualche caso sistemi produttivi di questo tipo sono visibili ancora oggi (v. p. 23 e 57).

3.3 L'età Romana

La romanizzazione del bacino Mediterraneo rappresenta un momento di grande unificazione politica ed economica, da cui l'industria siderurgica trae consistenti impulsi. Si tratta di un sistema economico che promuove l'urbanizzazione e dispone di un forte esercito e di conseguenza un eccezionale consumatore di ferro.



Mantice a membrana africano in legno con doppia camera sul tipo di quelli di cui è mostrata la struttura nella pagina a fronte.

La struttura produttiva romana risulta distribuita in poli specializzati accanto ai quali si riscontrano attività diffuse prevalentemente rivolte al soddisfacimento di bisogni locali²⁴, ma che all'occorrenza possono essere mobilitate anche per la produzione di manufatti per un mercato più vasto o per l'esercito.

Nel corso del I millennio a.C., mentre si consolida la tecnologia siderurgica a livello continentale, si registrano le prime importanti varianti nei sistemi produttivi. Da un lato sopravvivono per lungo tempo, in qualche caso addirittura fino all'età Moderna, i sistemi basati sul basso fuoco a catasta, realizzato a terra, talora entro un pozzetto o sul piano di una forgia e dall'altro decollano i bassi fuochi a camino, documentati anche nelle preziose raffigurazioni dei vasi attici ed etruschi, raggiungendo maggiori dimensioni, capaci di produzioni significative. Allo snodo di queste due tipologie di bassi fuochi si pongono le strutture come quella di Scarmagno²⁵ (Torino) e i numerosi casi francesi²⁶.

Il principale polo attivo in epoca romana è il grande distretto etrusco incentrato sull'isola d'Elba, Campigliese e Massetano, basato sull'estrazione e lavorazione della limonite e dell'ematite. Di questo periodo sono noti quasi 100 siti nell'isola e numerosi altri nella terraferma, particolarmente a Populonia²⁷ dove giganteschi cumuli di scorie sono la testimonianza più tangibile della colossale attività estrattiva e metallurgica che fanno di questo centro il principale polo siderurgico dell'antichità. Significativo a que-

²⁴ Cima 1987, p. 113.

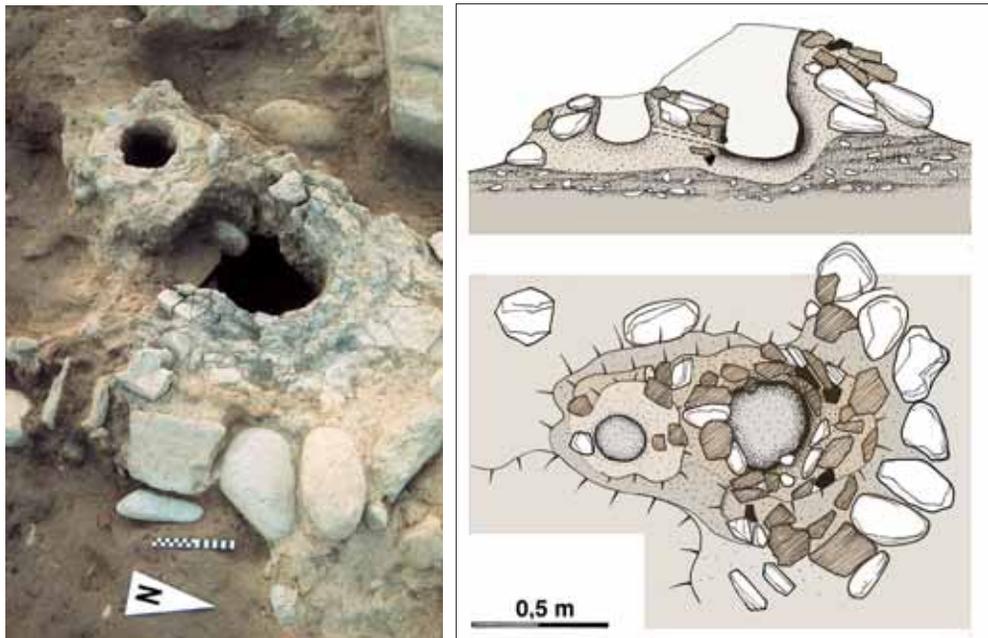
²⁵ Cima 2023, p. 189.

²⁶ Nolwenn 2021, p. 94.

²⁷ Grant 1982, p. 42 e Camporeale, Morolli 1985, p. 50.

3. Note di storia della siderurgia

sto proposito il contributo consistente in una grande quantità di ferro che Populonia, insieme con altre città etrusche, offre a Roma in occasione della spedizione di Publio Cornelio Scipione in Africa²⁸. Le tecnologie impiegate risultano essere ancora quelle protostoriche, incentrate su una duplice tecnologia: da un lato i piccoli centri produttivi continentali decentrati che operano ancora con la tecnologia del basso fuoco a catasta e quelli mediterranei, caratterizzati da grandi distretti, dove si registra la presenza di strutture di dimensioni maggiori elevate a camino²⁹, tutte caratterizzate da sistemi ma-



Sant'Eusebio - Scarmagno (Torino). Insediamento metallurgico tardo-La Tène (età Repubblicana). Particolare del basso fuoco a lato pianta e sezione del forno a pozzetto impiegato nella riduzione del minerale di ferro

nuali di ventilazione. Un polo di grande rilievo specializzato nella produzione di ferro e acciaio è quello del Norico (Austria), citato anche da Plinio il Vecchio³⁰, dove gli scavi archeologici hanno rilevato la presenza della tecnologia del basso fuoco a camino simile a quella protostorica di tradizione La Tène al più con qualche variante dimensionale, con bassi fuochi che raggiungono un diametro alla base di oltre 1 m, come quello scoperto nei pressi del villaggio di Semlach³¹ datato tra la fine del I e l'inizio del II secolo d.C. Accanto a questo polo sono attivi piccoli centri³² produttivi lungo il versante italiano dell'arco alpino, tra cui la Valcamonica³³ e il Canavese³⁴.

A Nord delle Alpi Occidentali sono attivi i poli elvetici dell'area La Tène nel Giura

²⁸ Grant 1982, p. 42 e Camporeale, Morolli 1985, p. 50.

²⁹ Camporeale, Morolli 1985, p. 52.

³⁰ Gaio Plinio, 1988, p. 263.

³¹ Ceck 2014, p. 11.

³² Predali 1980, p. 133. I rinvenimenti a Cividale Camuno indicano attività siderurgiche già in età Romana.

³³ Gaio Plinio, 1988, p. 261.

³⁴ Cima 1987, p. 113.

Vodese³⁵ e francesi, soprattutto nell'area di Bibracte³⁶, i quali continuano la loro attività impostata secoli prima senza apparente soluzione di continuità. Questi centri, piuttosto rilevanti, si inseriscono in un ampio universo celtico in cui la metallurgia è capillarmente diffusa. In generale, in ogni villaggio e ogni città, che in qualche modo possa avere collegamento con un'area mineraria, si trovano fonderie e fucine. Un'idea di questa situazione produttiva è offerta da numerosi "oppida" studiati in Francia dalla Bretagna ai Vosgi³⁷, nel Belgio meridionale³⁸ e in Lussemburgo, mentre un buon esempio di città con consistenti attività metallurgiche è rappresentato da Alesia³⁹.

Nella penisola Iberica trova impulso l'area basca, come testimonia ancora Plinio che cita in particolare i centri di Bilbili (Bilbao), Turiassone (Asturie?) e la Catena Cantabrica⁴⁰. In quest'epoca è forse collocabile la fase formativa della tecnologia del basso fuoco cosiddetto alla "catalana" che avrà una parte importante, sebbene non di primo piano, nella siderurgia europea. Nello stesso periodo è testimoniata un'attività metallurgica in Britannia a West Brandon nel Durham, a Chelm's Combe nel Somerset, a Aylsham nel Norfolk e nel Weald⁴¹.

Il mondo romano rappresenta una fase fondamentale nello sviluppo delle attività metallotecniche in genere e in particolare di quelle siderurgiche. L'enorme mercato rap-

Resti del basso fuoco di Semlach in Norico (Austria). I sec. a.C. (Da Cech, Rehren, 2015).

(Al centro) Analoga struttura a Heglesvollen Trøndelag (Norvegia). (Da A. Espelund).

(Sotto) Basso fuoco a pozzo di Clérimois - Yonne (Francia). (Da Cabboi et al. 2006).



³⁵ Pelet 1971, p. 233.

³⁶ Dechelette 1914, p. 1543.

³⁷ Cabboi 2004, p. 38.

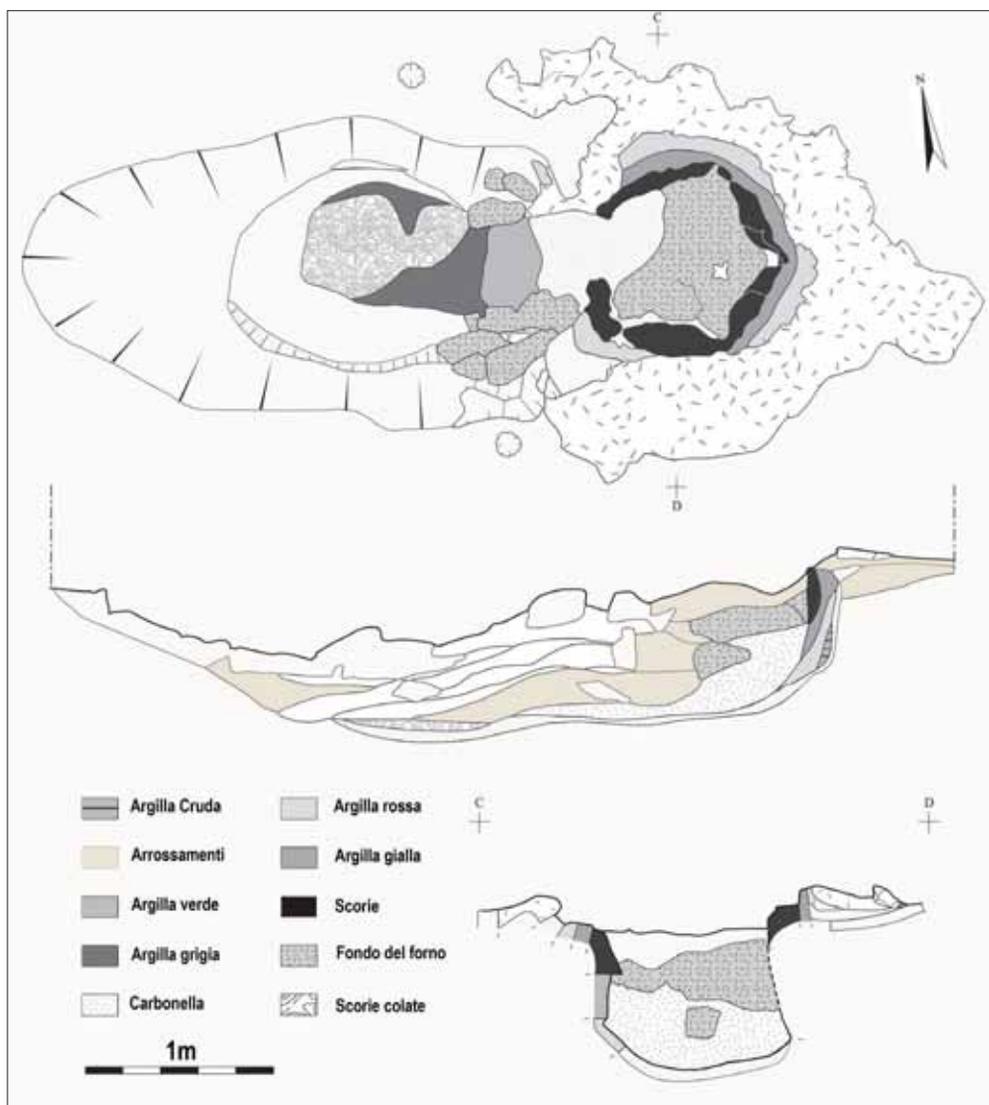
³⁸ Gille 1986, p. 97.

³⁹ Magnin 1982, p. 243.

⁴⁰ Gaio Plinio 1988, p. 261.

⁴¹ Cleere 1984, p. 4, Tylecote 1966, p. 89.

3. Note di storia della siderurgia



Pianta e sezione del basso fuoco a pozzo tardo-La Tène di La Bazoge, Sarthe -Francia. La struttura disponeva di un'elevazione fuori terra non conservata. (Da Cabboi et al. 2004).

presentato da un impero che abbraccia l'intero bacino del Mediterraneo, buona parte dell'Europa continentale e giunge alla Gran Bretagna, induce la formazione di grandi centri estrattivi e metallurgici, spesso gestiti da "societas". Queste sono generalmente rette da importanti pubblicani divenuti veri e propri imprenditori, responsabili di grandi distretti, le cui capacità produttive sono legate al massiccio impiego di manodopera a basso costo degli schiavi. Lo stato a sua volta elabora gli strumenti legislativi e burocratici per la gestione di un settore che costituisce uno dei principali fenomeni economici e strategici, producendo il primo corpus legislativo minerario che la storia conosca e le prime strutture amministrative di controllo statale delle miniere e della produzione me-

tallurgica. Fuori dalla sfera culturale romana, ma di grande interesse per la formazione della metallurgia del ferro europea è il centro minerario metallurgico dei monti Santa Croce in Polonia dove si sono rinvenuti migliaia di forni a pozzo raggruppati in batteria nel complesso di diversi atelier, attribuiti al III secolo d.C. Si tratta di uno dei poli produttivi germanici⁴² che si consolidano con apporti culturali e tecnologici dall'area orientale.

Attività siderurgiche sono attestate in Scandinavia. Nel sito palustre di Trøndelag in Norvegia si stima che intorno alla fine del II secolo d.C. si raggiunsero livelli di produzione particolarmente elevati con picchi stimati intorno a 40 t all'anno e sistemi produttivi basati su forni a camino molto simili a quello scoperto nel Norico a Semlach⁴³.

In Medio Oriente, pure con minori influenze sull'economia dell'Impero romano, sono attivi i centri dell'Anatolia, della Caucasia, della Transcaucasia e della Siria. Più a Est quelli iraniani e indiani, di cui si ha traccia anche nei testi latini.



Resti del basso fuoco di Vivungi in Scandinavia settentrionale; I sec. a.C. - I sec. d.C. (Da Bennerhag et al.).

3.4 Il Medioevo

La caduta dell'impero romano compromette il sistema produttivo, al punto che nell'Alto Medioevo lo splendore di certi distretti non è che un vago ricordo⁴⁴. La crisi delle grandi concentrazioni produttive è generalizzata ed evidente anche sul piano archeologico. Decadono i poli dell'Italia centrale e del Norico, mentre paiono meno influenzati dagli sconvolgimenti socio-politici quelli del Giura Vodese e dell'area Basca. Ciononostante, l'attività siderurgica e le innovazioni tecnologiche non si arrestano. Dall'area celto-germanica si fanno strada segnalazioni sempre più frequenti di attività basate su un concetto nuovo che vede protagonisti i detentori delle competenze tecniche⁴⁵, i quali operano in piccoli atelier. Questi sostituiscono i ricchi pubblicani romani, detentori delle *societas* ma non possono eguagliarli sul piano dei volumi prodotti, anche se definiscono un nuovo modello economico diffuso, che col tempo risulta prezioso per la crescita e l'affermazione delle comunità.

Le segnalazioni di attività siderurgiche alto-medievali si rifanno soprattutto alla tradizione germanica ove i metallurgisti e più genericamente i fabbri ricoprono un ruolo socialmente rilevante, testimoniato anche dalla cifra piuttosto alta del loro guidrigildo

⁴² Radwan 1966, p. 86 e Stenvik 2003, p. 124.

⁴³ Brandslet 2017, p. 2.

⁴⁴ Tutti i più grandi distretti minerari romani nell'alto Medioevo risultano inattivi o fortemente ridimensionati, a causa dello smembramento delle grandi compagnie minerarie.

⁴⁵ Cassinelli 1985, p. 187.

che si riscontra in tutta l'area merovingia⁴⁶. L'archeologia conferma questo modello grazie al rinvenimento di numerosi corredi nelle sepolture ove accanto alle armi talora si trovano attrezzi da fabbro o da orafo, come a Neuwied (Renania) o a Jutas (Ungheria). Analoghi rinvenimenti si registrano per l'area longobarda, tra i quali vale ricordare Gonnars (Udine) e Mezoband (Cecoslovacchia)⁴⁷ o Centallo (Cuneo - Italia). Ciò consente di collocare questi metallurgisti - guerrieri nella classe degli arimanni. Nello stesso periodo si riscontrano fucine connesse con insediamenti signorili germanici, come a Belmonte (Torino)⁴⁸ o a Invillino (Udine)⁴⁹, che paiono rivolte alla produzione sia di armi sia di attrezzi per la vita quotidiana.

Un esempio di grande distretto siderurgico alto-medievale è quello di Zelecovice in Moravia, ove si sono rinvenute due distinte batterie di piccoli forni a camino, attribuibili alla prima dominazione slava (V - VI secolo d.C.)⁵⁰.

Qualche secolo più tardi, con la perdita d'importanza della tecnica e delle produzioni manuali, i fabbri e più genericamente i metallurgisti risultano regrediti a più bassi ranghi sociali. L'ambiente italiano riporta numerosi esempi di servi che svolgono questo ruolo tecnico: all'abazia di Nonantola, al monastero di Sant'Ambrogio di Milano o presso il vescovo di Bergamo. Alla metà del XII secolo la stessa situazione si può ancora registrare a Mantova⁵¹.

A partire dal XIII secolo la situazione cambia. Ferrieri e fabbri sono presenti nel Milanese, nel Bergamasco e nel Bresciano come proprietari e talora prosperi valvassori⁵².

Nel Medioevo, come nella Preistoria, il metallo rappresenta uno degli elementi economici di maggior rilievo strategico. Ne è prova che ancora nel X secolo la produzione di armi, come la monetazione, a Venezia e Milano vengono strettamente sorvegliate dalle autorità statali⁵³.

Ulteriori informazioni sulla siderurgia medievale derivano dallo studio degli ambienti domestici ove, accanto alle strutture agricole, si riscontrano i resti di piccoli sistemi produttivi⁵⁴ destinati al soddisfacimento dei bisogni del padrone e degli abitanti della casa o al più del villaggio. Nella stessa epoca si fanno strada degli artigiani non inseriti nella comunità civile, che risiedono di preferenza nei boschi o nei luoghi isolati, i quali esercitano il mestiere producendo dei beni destinati ai mercati cittadini. Fossier vede in questi nuovi artigiani degli uomini che si rifanno alla tradizione eremitica⁵⁵ e ai quali si ispireranno presumibilmente i cistercensi, a partire dalla fine del secolo XI, per rinobilitare il lavoro manuale e la produzione, in un moto di grande tensione ideale. Dalla tradizione

⁴⁶ Cassinelli 1985, p. 187.

⁴⁷ Salin 1957, p. 214 e Cassinelli 1985, p. 194.

⁴⁸ Cima 2019, p. 79. In questo caso si tratta di una fucina dove risultano accumulati quintali di attrezzi in ferro.

⁴⁹ Pauli 1983, p. 269.

⁵⁰ Plainer 1963, p. 187.

⁵¹ Benoît, Cailleaux 1988, p. 129 e Schneider 1955, p. 111.

⁵² Ivi.

⁵³ Fossier 1985, p. 296.

⁵⁴ Ivi, p. 296.

⁵⁵ Fossier 1985, p. 301.

eremitica scaturisce l'importante ruolo dei detentori e diffusori delle conoscenze tecnologiche rappresentato dai monasteri cistercensi. Questo fenomeno si colloca in un momento di grande ripresa dell'Occidente dopo la depressione economica dei secoli precedenti e rappresenta forse l'antefatto che condurrà alla nascita della metallurgia moderna⁵⁶. Dati sullo sfruttamento minerario cistercense sono molto abbondanti a partire dal secolo XII. Bertrand Gille pubblica in sintesi ben 33 documenti per il solo XII secolo che si riferiscono alla produzione siderurgica dei monaci benedettini in Francia⁵⁷. Nel 1113 è citata una

forgia dell'abazia di Lyre in Normandia e una di quella d'Argy nell'Indre, nel 1115. In Champagne sono note attività estrattive e metallurgiche dell'abazia Pontigny nel 1143, in quella de La Crête nel 1156, nel 1157 all'abazia di Clairvaux, nel 1158 all'abazia di Boulancourt, e in quella d'Igny, e ancora, nel 1171 in quella di Troisfontaines; così all'abazia d'Auberive nel 1160. A quella di Guy nel 1248 è concesso il diritto di sfruttare una miniera e costruire una forgia. Nel XII secolo l'abazia benedettina di Saint Vanne di Verdun in Lorena possedeva una forgia, e altre forge sono citate per l'abazia di Saint Mansuy di Toul nel XV secolo. In



Resti del forno a manica a sezione quadrangolare tardo-medievale rilevato a Strambinello in Canavese (Torino).

Ungheria, nel 1226, è citata una forgia dell'abazia di Saint Martinsberg. Nel 1179 sono citate attività minerarie dei cistercensi di Chaligny, così per quelli di Clairvaux nel 1172, per quelli di Flabémont nel 1174 e per quelli di Beaupré nel 1182. Nel 1212 è la volta di quelli di Murbach e nel 1221 quelli di Saint Evre de Toul. Ancora, i monaci cistercensi di Ecurey e di Vaux en Mois dispongono di attività minerarie nel 1158, quelli di Vaux nel 1193 e quelli di Isle-en-Barrois nel 1179.

Informazioni circostanziate sulle attività siderurgiche dei monaci benedettini⁵⁸ sono

⁵⁶ Fossier 1985, p. 296 e Bouchayer 1955, p. 143.

⁵⁷ Gille 1962, p. 241.

⁵⁸ Bautier 1960, p. 9.

note anche nell'ambiente germanico, in quello italiano e in quello anglosassone.

Sotto la spinta dell'azione rinnovatrice dei monaci, le botteghe dei metallurgisti e dei fabbri, un tempo prerogativa di poche corti signorili, proliferano insediandosi intorno ai castelli ove trovano protezione e mercati per lo smercio dei prodotti, divenendo elementi di rilievo nel complesso fenomeno di formazione degli insediamenti burgensi e più tardi delle corporazioni⁵⁹.

Relativamente alla dimensione dei sistemi produttivi e alle forme di conduzione,



Grande forno a camino del popolo Fipa in Tanzania al termine di un processo di produzione con il maestro e in suoi aiutanti. A terra le fistole fittili dei mantici. (Fotografia scattata nel 1914 da Wyckaert).

le scarse informazioni sulla siderurgia altomedievale rimandano ad atelier normalmente piccoli, gestiti dai tecnici sotto lo stretto controllo signorile o monastico. La tecnologia del forno a camino nelle diverse varianti dimensionali, già presente nel mondo greco e in quello romano, trova affermazione nei distretti produttivi alto-medievali anche se la tradizione del forno a catasta, spesso infossato a pozzo non risulta scomparsa e caratterizza i poli produttivi più piccoli, percorrendo un cammino evolutivo parallelo. Vanno altresì segnalate tecnologie più evolute che prevedono forni a camino maggiormente strutturati, costruiti in solida muratura, che gli scrittori tecnici rinascimentali definiscono “forni a manica”. Questi sono alla base di una linea evolutiva che nei secoli del medioevo conduce alla costruzione dei primi altiforni che funzionano con processo indiretto, ovvero producendo ferraccia (ghisa) che richiede successiva affinazione. Questa tipologia di strutture è descritta nei trattati cinque-secenteschi ed è documentata da diversi rinvenimenti archeologici, come quello di Kropa in Slovenia o Lappytan in Svezia di cui si discuterà più oltre, solo per citare due casi emblematici (v. p. 152 e segg).

⁵⁹ Gille 1962, p. 316 e Settia 1984, p. 311.

L'ambiente produttivo europeo, pure nella sua grande articolazione geografica e politica offre diversi esempi di sistemi metallurgici diffusi, ben integrati nel substrato sociale solidamente vincolato alle attività di tipo rustico. Si tratta di pratiche metallotecniche presenti in un universo agro-pastorale a integrazione delle risorse che le comunità possono trarre dai lavori nei campi. Ne derivano modelli a economia mista, spesso difficili da comprendere fino in fondo, in equilibrio sempre precario tra le esigenze del mondo rurale e le spinte produttive che i mercati in via di riconfigurazione vanno definendo.

Molto più tardi, con la formazione delle comunità, la difficile convivenza di due settori produttivi, talora antitetici, induce gli organismi di governo a produrre sistemi di regolazione particolarmente rigidi, in grado di contrastare la prevaricazione di una componente dell'economia sull'altra⁶⁰. Ragioni di mantenimento di un equilibrio di per sé precario e di controllo della produzione metallurgica sono alla base della nascita degli statuti minerari che direttamente o indirettamente si rifanno alle leggi regali.

Un primo caso di attività siderurgiche diffuse in un ambiente rurale è attestato nelle terre del convento di Santa Giulia a Brescia, ove nel IX - X secolo, gli oltre 1.000 coloni del massaricio distribuiti in circa 80 aziende agrarie sparse tra le Prealpi Bresciane e l'Appennino Modenese, in 120 casi, consegnano ferro insieme ad altri prodotti artigianali e agricoli. In totale, in un solo anno, si riscontrano 340 libbre di ferro semilavorato in masselli (pari a circa 170 Kg), 29 vomeri, 3 scuri, una mannaia, 2 forconi e 3 falci. Ancora nel corso del X secolo, negli inventari del monastero di San Tommaso di Reggio Emilia, a fronte di 156 servi si consegnano 6 vomeri, 11 zappe, 6 mannaie, 4 scuri, 18 falci messorie e 3 piccole falci⁶¹. Informazioni analoghe provengono dall'ambiente transalpino. L'abazia di Lorsch nel 788 riceve dal villaggio di Weilnau dei banni pari a circa 30 Kg di ferro ogni anno⁶², mentre l'abazia di Fulda in Assia, nel 912, riceve, dal villaggio di Mottau, a titolo di banno, una quantità imprecisata di ferro grezzo⁶³. Ancora, in un inventario del monastero di Corvey nell'intervallo 1106 - 1128⁶⁴, figurano 50 pezzi di ferro. Nel 1214 a Neuchâtel nel Giura Vodese vengono pagati censi in ferro. La chiesa di Salisburgo riceveva anch'essa banni in ferro⁶⁵, così come l'abazia di Saint-Germain-des-Près in Normandia⁶⁶. Il Domesday Book del 1086 riporta quattro mulini presso Lexworthy nel Somerset che pagano censi in ferro⁶⁷.

Una situazione analoga è probabile in Canavese (nelle Alpi occidentali), dove le tracce di un sistema produttivo incentrato sulla metallurgia del ferro in età tardo-antica

⁶⁰ Sono un esempio gli statuti delle comunità minerarie che contengono d'abitudine norme miranti a regolare l'economia produttiva degli atelier minerario-metallurgici in funzione delle esigenze primarie delle attività agro-silvo-pastorali.

⁶¹ Fumagalli 1980, p. 21.

⁶² Ivi.

⁶³ Gille 1968, p. 99.

⁶⁴ Pelet 1978, p. 19.

⁶⁵ Ivi 1960, p. 105.

⁶⁶ Pelet 1978, p. 19.

⁶⁷ Ivi, p. 53. Si tratta di registrazioni tra le più antiche e trattandosi di mulini dobbiamo supporre che impiegassero congegni azionati da ruote idrauliche altrimenti sarebbero stati classificati come semplici "ferreriam".

e alto-medievale si riscontrano in un vasto ambiente distribuito tra la pianura e le valli, senza particolari connessioni con i centri di coltivazione mineraria che si collocano negli ambiti vallivi più interni. Le tracce delle strutture produttive, riscontrate durante una vasta campagna di rilevamenti archeologici, risultano associate a insediamenti rustici che definiscono il tessuto antropico dell'area, suggerendo una stretta connessione tra distribuzione degli uomini sul territorio e distribuzione delle attività produttive⁶⁸. Questo modello economico è confermato da filze che regolano il pedaggio delle merci a Cuornè del 1298, riprese nel 1429⁶⁹ e ancora dagli statuti di Pont e Valli del 1346 che riportano informazioni circa banni pagati in ferro⁷⁰.

La grande diffusione delle attività siderurgiche è la premessa per la formazione delle comunità minerario - metallurgiche, di cui si ha traccia nella storiografia europea. Un esempio di comunità produttrice di metallo è contenuto in un diploma imperiale del 1047 riguardante la valle di Sclave nelle Alpi Centrali⁷¹. Un privilegio analogo è concesso dal delfino Giovanni II alla comunità di Alleverd nel Delfinato, nel 1315. Egli concede a tutti gli abitanti, di qualsiasi condizione, di estrarre il minerale, pagando un diritto in natura proporzionale alla quantità estratta, l'ammontare del quale viene venduto una volta all'anno all'incanto in un giorno di mercato⁷². L'ottenimento di privilegi particolari da parte delle comunità medievali produttrici di metallo non è un fatto isolato. Nella foresta dell'Othe in Champagne, nel 1276, i conti sanciscono uno stato particolare per le fonderie e le fucine⁷³. Analogamente a Vicdessos nell'Aude, una franchigia concessa dal conte di Foix nel 1272 riferisce della proprietà che esercitano collettivamente gli abitanti della comunità sulle miniere. Analogo, ma molto più tardo è il "*Papier de la Mynière de Beaumont*", un registro di giurisdizione che copre il periodo 1462-68 e conferma, per la regione Saint- Remy-sur-Orne, la presenza di un sistema minerario-metallurgico diffuso⁷⁴.

Il medioevo è una fucina di esperienze e di innovazioni e proprio in questo periodo l'evoluzione del forno a camino conduce prima alla formazione del forno a manica e più tardi, con un'ulteriore evoluzione, all'altoforno. I dati storici e archeologici relativi a questa evoluzione sono scarsi. Unicamente sappiamo che già nel XV secolo è attivo il procedimento indiretto nelle valli bresciane, ove viene impiegato il cannechio⁷⁵: un forno a manica molto alto che funziona con il processo indiretto producendo ghisa.

⁶⁸ Cima 1987, p. 173.

⁶⁹ Bertotti 1982, p. 62.

⁷⁰ Frola 1918, p. 63. Le valli di Pont rappresentano uno dei poli dove si concentra l'attività estrattiva e metallurgica.

⁷¹ Gille 1968, p. 99. Il diploma dell'imperatore Enrico III (1047) conferma e amplia quanto già concesso in precedenza (verosimilmente da Ottone I nel 961) agli abitanti della valle, in particolare la libertà di vendere il ferro per tutto il territorio soggetto alla sua autorità.

⁷² Ivi, p. 100.

⁷³ Ivi e Dureault 1961, p. 159.

⁷⁴ Dureault 1961, p. 160.

⁷⁵ Cima 1999, p. 214. Grandi forni a manica che funzionano con il procedimento di riduzione diretto, di fatto veri e propri altiforni sono noti anche in Svezia, nel polo vallone e in altri contesti europei, caratterizzati da elevate produzioni.

Durante il Medioevo il ferro continua a occupare il posto preminente tra i metalli di prima necessità per gli oggetti della vita quotidiana. Nel corso del XV secolo si assiste a un grande aumento della domanda di metallo che si accompagna a un colossale incremento dell'attività mineraria⁷⁶ la quale induce consistenti innovazioni nelle tecniche di sfruttamento del sottosuolo. Fossier stima che nei settant'anni compresi tra il 1460 e il 1530 la produzione di ferro venga quadruplicata e spiega il fenomeno con il grande progresso della tecnica in tutti i campi⁷⁷. Ciò richiede macchinari sempre più sofisticati in cui il ferro è spesso l'elemento essenziale. Così nel campo bellico ove gli eserciti richiedono armamenti sempre più efficaci e potenti. Ultima ma non meno importante nella crescita del mercato medievale del ferro, è l'evoluzione edilizia stimolata da un marcato urbanesimo.

Un breve cenno a parte merita la siderurgia dell'immenso mondo islamico che proprio nel Medioevo si sviluppa fino ad abbracciare un territorio vastissimo che va dalle porte dell'India alla penisola iberica. Sul piano tecnologico non si registrano differenze particolari rispetto ai sistemi europei. In questo ambiente sono diffusi sia il basso fuoco a pozzetto o a catasta, sia quello a camino e più tardi a manica nelle diverse varianti. I principali distretti produttivi sono distribuiti in tre grandi aree: Penisola Iberica, Africa nord-occidentale e Medio Oriente.

In Spagna i centri di Cartagena e Murcia producono ed esportano verso oriente anche i manufatti che giungono dai centri dell'interno, tra cui in particolare Saragozza, Costantina, Castillo del Hierro, Grenada e Toledo, dove si producono le famosissime lame temprate. Nell'ambiente islamico attività di una certa importanza sono segnalate anche a Palermo dove risulta attiva una miniera che alimenta un quartiere dei fabbri. Anche qui una porta della città era in ferro. I principali centri del Nord Africa si



I resti di uno dei forni a camino di Tiwêga presso Kaya in Burkina Faso, alto circa 2,20 m è rimasto in uso fino all'inizio del XX secolo in un contesto a forte stratificazione di strutture produttive.

⁷⁶ Block 1977, p. 78.

⁷⁷ Fossier 1987, p. 409.

concentrano lungo il fiume Ouenza in Tunisia, sulle montagne intorno a Cap Ferrat in Algeria e a Rifin Marocco. A Bougie e ad Algeri, ancora nel XVIII secolo, si registra una produzione di piccole barre di ferro al basso fuoco e anche di piccoli blumi dal peso di mezza libra che vengono utilizzati come denaro. Altri centri di riduzione dei minerali di ferro di una certa importanza si trovano a Melilla sulla costa orientale del Marocco, a Sud del Medio Atlante in una regione definita dai portoghesi “*Serra das ferrarias*” e nell’Alto Atlante, nella regione abitata dai Gazzula che risultano i primi africani ad aver adottato un procedimento indiretto sin dal tardo medioevo. Una caratteristica saliente dell’Africa Settentrionale islamica, che sottolinea l’importanza della siderurgia, risiede nel fatto che molte delle città fortificate nel Medioevo erano dotate di porte in ferro, come Sfax, Sabra Masurriyya e Mahdiyya in Tunisia o Sigilmasa in Marocco⁷⁸. Qualche rara attività estrattiva e metallurgica è segnalata in Egitto, Qui il ferro oolitico estratto dalle alluvioni del Nilo non è sufficiente ad alimentare gli atelier attivi nei grandi centri del delta e di conseguenza, sin dall’antichità l’Egitto importa ferro dalle regioni vicine e addirittura dall’India.

Molto più a Sud, nel cuore dell’Africa (oggi Burkina Faso) sono noti grandi distretti siderurgici attivi a partire dal secolo VIII, con alterne vicende rimasti in funzione fino all’età Moderna. Il più significativo si trova Tiwêga presso Kaya, dove si conserva una batteria di otto forni a camino del tutto simili a quelli impiegati nell’antichità classica nel bacino del Mediterraneo. Altri distretti con significative testimonianze archeologiche dei forni di riduzione sono a Yamané, Kindibo e Békuy⁷⁹.

Ben diversa è la situazione della Siria che nel Medioevo fa registrare sfruttamenti intensi nella regione di Germanicia e in Cilicia e anche nel vicino Libano, sulle montagne che sovrastano Beirut. Per tutto il Medioevo e anche oltre, Damasco è nota come uno dei principali centri di produzione e lavorazione del ferro del mondo islamico, in cui vengono prodotte le famosissime lame damaschinate forgiate con l’impiego di lamine di un particolare acciaio prodotto al crogiolo.

In Cina il procedimento indiretto entra in funzione precocemente, la prova tangibile è il mastodontico leone guardiano in Ghisa di Cangzhou nella provincia di Hebei, alto oltre 6,50 m, gettato *in situ* a metà del X secolo (953 d.C.).

3.5 L’età Moderna

Al termine del Medioevo il panorama tecnologico europeo fa registrare un importante polo produttivo collocato nell’area dell’attuale confine franco-tedesco-belga ove numerosi comprensori produttivi concorrono alla creazione di un ampio contesto territoriale identificato come “Distretto Vallone”. Di poco a Est, nel cuore del mondo germanico, il grande ambiente siderurgico di Turingia, Sassonia e Hartz raggiunge molto

⁷⁸ Lombard 1974, p. 151.

⁷⁹ Tutti questi siti dal luglio 2019 sono stati iscritti nella lista patrimonio dell’umanità dell’Unesco.

presto un elevato livello tecnologico e produttivo⁸⁰.

Nella parte meridionale del continente, il polo alpino con la concentrazione industriale delle valli italiane bresciano - bergamasche e delle regioni austriache di Stiria e Carinzia, rappresenta una terza grande area siderurgica con un ruolo altrettanto importante nella crescita dell'industria europea. Il distretto centro-italico dell'Elba, Campi-gliese e Massetano in questa fase risulta aver esaurito il ruolo di polo trainante rivestito nell'Antichità ed è in preda a una consistente riorganizzazione.



Atelier di fabbro a Simariango sulle rive del fiume Zambesi nel cuore dell'Africa, incisione tratta da una fotografia scattata da David e Charles Livingstone intorno alla metà del XIX secolo. Questa incisione documenta piuttosto bene la labilità della struttura materiale degli atelier, come si è rilevato negli scavi.

I rapporti tra le strutture produttive situate sul versante meridionale delle Alpi e quelle transalpine sono piuttosto stretti. La migrazione di operai italiani verso le aree siderurgiche mitteleuropee e viceversa è testimoniata durante il Medioevo e i primi secoli dell'età Moderna⁸¹. La cesura tra le due grandi aree tecnico-culturali germanica e italiana, a partire dal medioevo, è rappresentata dai poli produttivi delle Alpi centro-orientali. Le tecnologie impiegate nel distretto centroalpino delle valli Camonica, Trompia e Sabbia e in quello di Stiria e Carinzia, offrono consistenti analogie, particolarmente per quanto attiene alla struttura di un forno a manica di grandi dimensioni che a tutti gli effetti si può definire un altoforno. Anche nel distretto austriaco, sin dal XVII secolo, viene

⁸⁰ Cima 1987, p. 211.

⁸¹ Da Lezze 1973, p. 615. Descrivendo Lavinione in val Sabbia sottolinea: «...gli uomini sono buoni maestri da lavorar ferri. Vanno continuamente luor a lavorar nelle fucine, parte in terra tedesca in Schiavonia, in Lobucio, in Romagna. Fiorenza, Parma et altri luoghi...».

impiegato un forno analogo con ventre a doppio tronco di piramide a sezione quadrata, alto circa 7 m, quasi certamente indotto dall'ambiente italiano. Sulla base delle osservazioni del Della Fratta, che attribuisce all'ambiente bresciano-bergamasco il grande forno, detto "canecchio"⁸², con il ventre a tronco di piramide rovesciata e quello più piccolo, con profilo a doppio tronco di piramide, a generici distretti transalpini, si può ritenere che la chiave della formazione del primo altoforno moderno risieda nella mutua influenza dei due grandi ambienti tecnologici. Il forno realizzato sulla struttura materiale



Altoforno a carbone di legna in funzione al momento della colata in un dipinto (olio su rame) di Jan Bruegel il vecchio (1568-1625) datato intorno al 1602, mostrato nel momento della colata della ghisa. A sinistra la ruota idraulica di azionamento dei mantici. Il dipinto è conservato nella Galleria Doria Pamphilj a Roma.

del canecchio, con il ventre a sezione quadrata e profilo a doppio tronco di piramide pare scaturire dai fitti contatti tra l'ambiente austriaco e quello italiano⁸³.

Il complesso sistema di scambi tecnologici a cui è soggetta l'Europa centromeridionale a partire dalla fine del Medioevo, non sembra interessare il distretto produttivo vallone. In questo ambiente, sin dalla metà del XVII secolo, si registra la presenza di un altoforno a sezione circolare straordinariamente alto (fino a 8 - 9 m), ormai notevolmente simile agli altiforni moderni, diffusi in Europa nel corso del secolo successivo⁸⁴. Questo impianto è costruito sul principio della doppia muratura che consente il rifacimento delle parti interne in laterizio, senza richiedere un intervento sull'intera struttura.

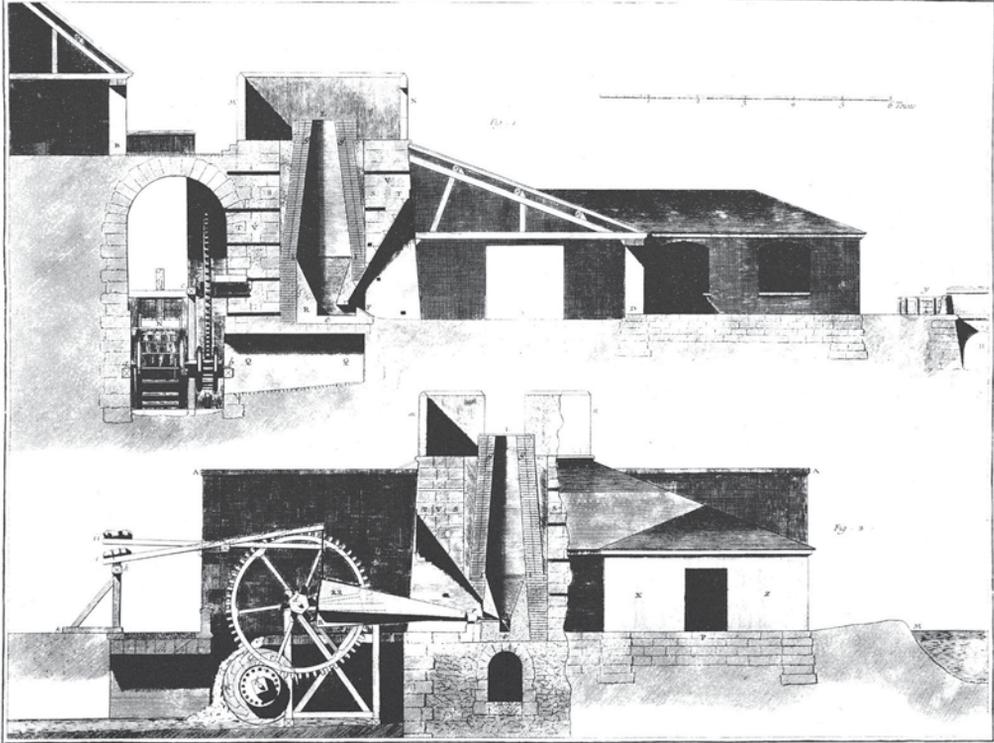
I contatti, nel corso del XVI secolo tra questo grande polo tecnologico e quelli cen-

⁸² Della Fratta Montalbano 1678, p. 212.

⁸³ Krulis Randa 1967, p. 248.

⁸⁴ Ivi, p. 258.

tro-europei, sono frequenti e la presenza, sin dal XVI secolo, di un altoforno a sezione circolare con profilo a doppio tronco di cono, in Boemia, pare confermare una diffusione tecnologica del polo vallone verso i distretti orientali, attraverso l'ambiente produttivo siderurgico della Sassonia-Turingia-Harz. In questi anni, in tutti i poli tedeschi e ceco-slovacchi è largamente diffuso l'altoforno a sezione quadrata o più raramente poligonale, con profilo a doppio tronco di piramide, alto circa 7 m, di provenienza alpina⁸⁵. Un possibile punto di contatto del polo tedesco con il distretto austriaco di Stiria e Carinzia,



Due viste di un altoforno a carbone di legna a sezione ellittica alimentato da mantici azionati idraulicamente dall'*Encyclopedie di Diderot et D'Alembert*.

è la Boemia. Qui, a metà del XVIII secolo, Massimiliano von Dietrichstein costruisce un forno carinziano⁸⁶. Il caso non è isolato. Sin dalla fine del Medioevo si riscontra una consistente uniformità tecnologica di questi distretti produttivi con i poli alpini⁸⁷. Contatti precisi sono provati tra il polo vallone e quello svedese già alla fine del XVI secolo. Pochi anni dopo, nel 1604, in seguito al trattato di Norrkoping, la tecnologia dell'altoforno tedesco viene importata in Svezia insieme con numerosi tecnici⁸⁸.

La metà del secolo XVII è un momento di grande fermento nell'industria siderurgica

⁸⁵ Krulis Randa 1967, p. 258.

⁸⁶ Ivi.

⁸⁷ Questo fatto pare confermato dalle osservazioni del Della Fratta Montalbano (p. 84 e segg.), ove descrive le caratteristiche del forno a manica con precisi riferimenti alla struttura messa a punto dal polo lombardo-veneto definita "cannecchio".

⁸⁸ Krulis Randa 1967, p. 247.

europea. Anche i distretti inglesi incentrati sull'altoforno a sezione quadrata a doppio tronco di piramide introducono innovazioni significative. In una prima fase⁸⁹ il crogiolo diviene circolare in un altoforno di Coed Ithel (Monmouthshire), mentre un altoforno interamente circolare, costruito con la tecnica della doppia muratura, è attestato soltanto nel 1711 nella foresta di Dean⁹⁰. Negli anni successivi si verifica un rapido ricambio della tecnologia dell'altoforno inglese che abbandona il profilo a sezione quadrata per adottare, in un tempo sostanzialmente breve, quella circolare su cui si baserà la più im-



Il corpo settecentesco ben conservato dell'altoforno a carbone di legna (Hochofen) ricostruito su una struttura più antica a Vordernberg Leoben in Stiria (Austria).

portante innovazione tecnologica in campo siderurgico del XVIII secolo: la definizione - a partire dal 1735 - di un procedimento di riduzione dei minerali di ferro mediante il combustibile costituito dal carbon fossile⁹¹. L'industria inglese, generalmente poco sviluppata e arretrata fino ai primi anni del XVIII secolo, riceve impulsi di grande rilievo con l'introduzione di questo processo che consente l'affrancamento dal carbone di legna divenuto spesso la risorsa critica in grado da sola di compromettere interi sistemi produttivi⁹². I tentativi d'impiego di questo importante combustibile derivano dalla particolare carenza di legna in cui versano le campagne inglesi. Il primo processo realizzato con questa

tecnica è dovuto ad Abram Darby⁹³ che lo sperimenta nel suo forno di Coalbrookdale nel 1709, ma occorre attendere il 1735 per vederlo applicato su scala industriale⁹⁴.

A Sud del continente europeo, al margine occidentale delle Alpi, il distretto savoiardo e del Delfinato, continua l'attività con un sistema tecnologico complessivamente

⁸⁹ Tylecote 1979, p. 106.

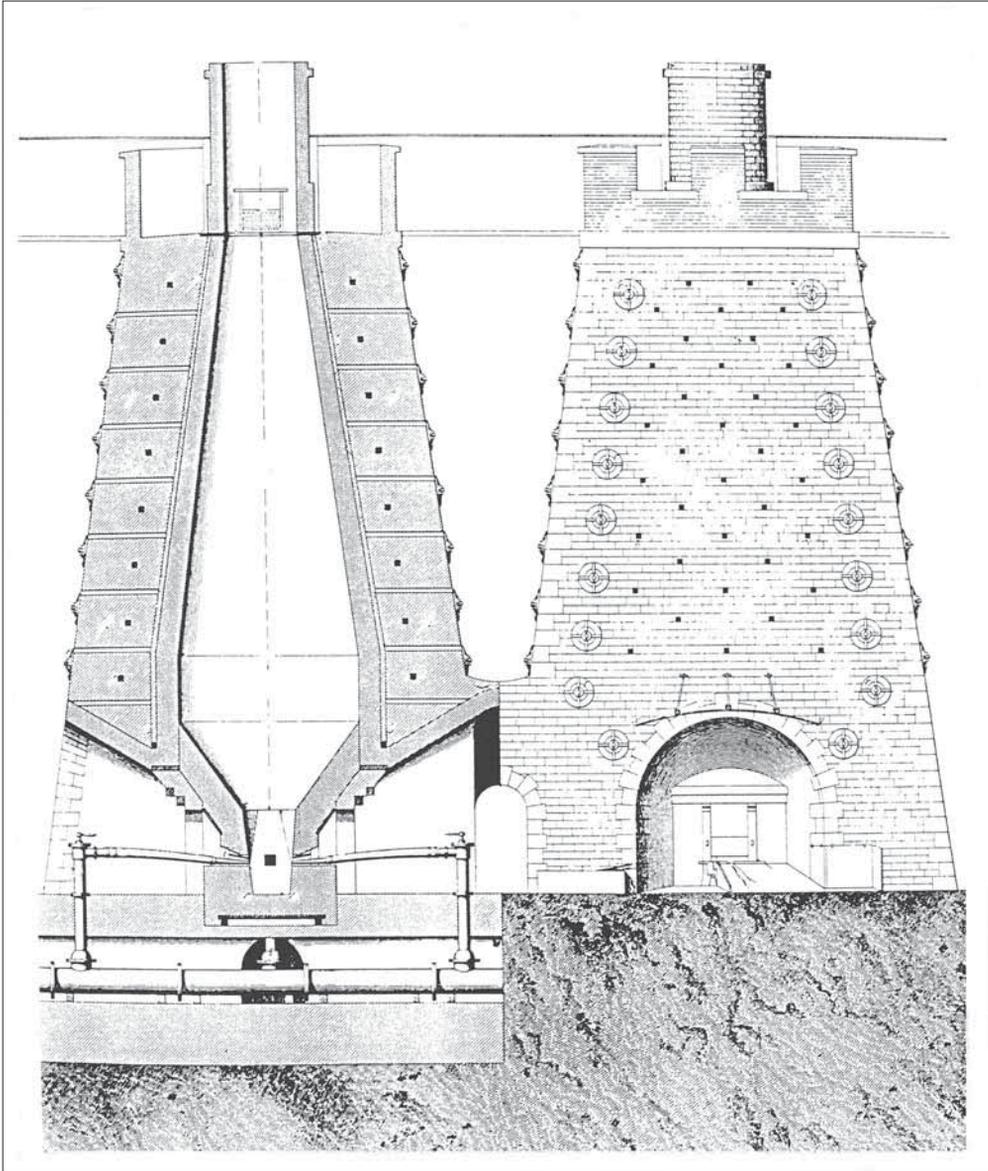
⁹⁰ Tylecote 1966, p. 87.

⁹¹ Shubert 1966, p. 104.

⁹² Ivi, p. 106.

⁹³ Williams, 2017, p. 25.

⁹⁴ Ivi, p. 104.



Prospetto e sezione del forno a carbon fossile di La Voute - Ardèche - Francia. (Dal trattato di W. De Saint Ange "Métallurgie Pratique du Fer" edito nel 1835). Sistemi come questo a partire dalla fine del XVIII secolo hanno progressivamente rinnovato le strutture produttive siderurgiche europee.

obsoleto incentrato sull'altoforno a doppio tronco di piramide⁹⁵ a sezione quadrata di tipo bresciano-bergamasco. I contatti di questo distretto con la tecnologia del grande sistema produttivo delle Alpi centrali è molto chiaro, soprattutto nelle strutture materiali secentesche recentemente studiate e riferibili con estrema precisione al canneccio bresciano introdotto probabilmente attraverso la valle d'Aosta. Il rinnovamento avviene

⁹⁵ Leon 1960, p. 28.

negli anni successivi e in età napoleonica con l'introduzione dell'altoforno a sezione circolare a carbon fossile.

Poco più a Nord del Delfinato, un grande polo produttivo è localizzato nel complesso montuoso del Giura e della Franca Contea. Qui, nel 1812 sono ancora in funzione alcuni antiquati altiforni a sezione quadrata di tipo bresciano-bergamasco, benché ormai largamente sostituiti dalle strutture a sezione circolare indotte dal vicino distretto vallone⁹⁶. A partire da questo polo i forni circolari vengono introdotti nell'Italia Settentrionale, anzitutto nel distretto canavesano⁹⁷, nell'ultimo decennio del XVIII secolo, dove sin dalla metà del Seicento si era diffusa la tecnologia del cannechio bresciano coinvolgendo anche la Valle d'Aosta⁹⁸.

Nella seconda metà del Settecento, la tecnologia inglese degli altiforni a carbon fossile con ventre a forma circolare, è sufficientemente affermata e conosce importanti fasi diffusive sul continente. Il primo caso di impianto noto fuori dalla Gran Bretagna, riguarda l'altoforno di Hayange in Lorena, attivo sin dal 1769⁹⁹, mentre pochi anni più tardi il famoso tecnico inglese Wilkinson impianta un'acciaieria funzionante a carbon fossile a Indret presso Nantes in Normandia¹⁰⁰. Sul finire del secolo (1799), un grande altoforno a coke viene impiantato in Prussia a Königshutte. Nel 1802, anno del suo primo funzionamento a regime completo, questo forno produce 2.000 t di ghisa¹⁰¹.

Nel contesto ampio alla grande diffusione europea del cannechio e successivamente dell'altoforno a sezione circolare, fino alla metà del XIX secolo permane un'area piuttosto vasta ove la tecnologia dominante continua a essere quella del basso fuoco nelle due versioni simili catalana e ligure-piemontese. Si tratta dei due grandi ambienti pirenaico meridionale e delle Alpi Occidentali¹⁰². Nell'area pirenaica durante il Medioevo e tutta l'età Moderna è diffusa una variante del basso fuoco a pozzo, di dimensioni ragguardevoli, in grado di produrre con processo diretto masselli di diverse decine di chilogrammi ogni 8-12 ore. Nell'ambiente alpino occidentale è diffusa una versione del basso fuoco a catasta che consente produzioni più contenute, ma offre il vantaggio di poter essere impiegato indifferentemente come forno di riduzione e fuoco di forgia¹⁰³. In Canavese l'introduzione del cannechio soppianta in buona parte i bassi fuochi ma l'ambiente siderurgico della Liguria resta vincolato alla tecnologia del basso fuoco fino al primo quarto del XIX secolo quando i metodi antichi in breve tempo vengono abbandonati e si estinguono mentre parallelamente subentrano le grandi strutture industriali che impiegano gli altiforni a carbon fossile¹⁰⁴.

⁹⁶ Pelet 1971, p. 77.

⁹⁷ Cima, Pasinato 1984, p. 15.

⁹⁸ Cima 1989, p. 33.

⁹⁹ Moureaux 1964, p. 28.

¹⁰⁰ Pelatan 1985, p. 332.

¹⁰¹ Smidt 1941, p. 55. Nel 1835 nell'ambiente di questa industria il pittore A.F. Mezel dipinge "La forgia" v. p. 240.

¹⁰² Cima, Pasinato 1984, p. 15.

¹⁰³ Cima, Pasinato 1984, p. 15.

¹⁰⁴ Cima 1989, p. 35.

4. CIRCOLAZIONE DEI TECNICI E DELLE CONOSCENZE

La diffusione delle conoscenze sulla metallotecnica del ferro, a partire dai primi centri produttivi anatolici, (fino ai più lontani distretti nord-europei è ascrivibile soprattutto alla circolazione dei tecnici che trasferiscono conoscenze da un ambiente culturale all'altro secondo dinamiche complesse.

I metallurgisti sono tenuti in grande considerazione in seno alle comunità del mondo antico e ancora nel Medioevo, come già accennato, presso molti popoli ricoprono ruoli sociali importanti, in quanto detentori di competenze tecniche che consentono la produzione di oggetti di grande valore economico destinati a larga diffusione. I metallotecnici del mondo antico sono solitamente mobili e questa è forse la ragione di una relativamente rapida diffusione della tecnologia metallurgica anche nelle sue più antiche manifestazioni. Anche se le documentazioni sono tarde, è possibile che forme di artigianato itinerante legato al ferro si manifestino già nei primi secoli del I millennio a.C., quando questo tipo di metallurgia raggiunge una certa diffusione nell'Egeo, in Medio Oriente e in qualche area dell'Europa centro-orientale¹. Peraltro, già nel II millennio a.C. sono attestate circolazioni di metallurgisti fonditori di manufatti in bronzo². Gli artigiani del ferro verosimilmente percorrono gli stessi itinerari conducendo nuove conoscenze che garantiscono il diffondersi con grande rapidità della siderurgia nei paesi affacciati al Mediterraneo attestandosi nei grandi poli minerari. Di qui sembra partire l'irraggiamento verso le terre continentali, generando nuovi centri di conoscenza, i quali talora autonomamente sviluppano metodi e tecniche che lentamente conducono a maturazione il sistema.

Il primo movimento, a livello intercontinentale, che contribuisce l'origine della diffusione della metallurgia del ferro riguarda la migrazione verso occidente di metallurgisti mediorientali che giungono prima nell'area danubiana e nell'Egeo e successivamente nelle coste nord-africane e in quelle dell'Europa Meridionale, fino a raggiungere l'alto Adriatico. La Grecia risente, più direttamente, delle influenze anatoliche che si trasmettono attraverso l'Egeo. Non si tratta di movimenti isolati, bensì della migrazione massiccia, sia per via di terra, sia attraverso il mare. A Settentrione, intorno alla fine dell'IX secolo a.C., si definisce il movimento verso Occidente di popolazioni nomadi di cavalieri che, partendo dall'area caucasica, attraversano la Russia Meridionale e si installano in Ungheria. Essi conoscono bene la metallurgia del ferro e di qui la diffondono verso le Alpi³. Una linea di diffusione più meridionale parte dalle coste fenicie del Libano e tocca l'Egitto, l'area cartaginese, fino a raggiungere l'Atlante marocchino e la Spagna. Una testimonianza notevole dell'influenza fenicia si trova a Toscanos presso Malaga, dove

¹ Forbes 1981, p. 582.

² Cima 2023, p. 110.

³ France-Lanord 1956, p. 32 e Marechal 1983, p. 184.

4. Circolazione dei tecnici e delle conoscenze

un insediamento fenicio ha restituito consistenti evidenze di un atelier siderurgico⁴. Qui si sono riconosciuti i resti di un forno a camino e molti manufatti.

Metallurgisti villanoviani provenienti dall'area bolognese, attraverso la dorsale appenninica, trasferiscono le nuove conoscenze tecniche all'ambiente culturale omogeneo dell'Etruria, influenzando in maniera determinante la grande area mineraria dell'Elba - Campigliese - Massetano⁵, dove già era attiva una fiorente attività estrattiva del rame e un sofisticato artigianato del bronzo. Nella stessa epoca si sviluppa il grande polo produttivo del Norico⁶. Da questi poli principali nella prima metà del I millennio a.C. hanno inizio le diffusioni secondarie verso il continente europeo, dovuta per larga misura alla circolazione dei tecnici partiti dalle Alpi austriache che per primi giungono a livelli tecnologici di grande rilievo⁷. La mancanza di fonti scritte non consente un'indagine dettagliata, ma sulla base dei contatti culturali, di cui si ha traccia attraverso l'archeologia, è possibile definire degli areali di influenza ove quasi sempre emergono aspetti metallurgici. Il Norico diffonde conoscenze metallotecniche anzitutto a Nord della catena alpina lungo il grande asse di comunicazione Danubio-Inn e dell'alto Rodano⁸. Altri movimenti di tecnici sono probabili, anche se scarsamente documentati, verso l'area più occidentale della Francia settentrionale.

Le Alpi Centrali (Valcamonica e Comasco) sono influenzate dall'ambiente proto-etrusco e quindi forse più connesse al grande polo siderurgico dell'Italia Centrale, anche se i contatti con il grande centro transalpino del Norico sono scontati.

Le vallate italiane delle Alpi Occidentali conoscono la metallurgia del ferro anche attraverso la penetrazione di metallurgisti itineranti provenienti da Nord e da Nord-Ovest probabilmente dai centri dell'ambiente dell'alto Rodano e dal Giura Vodese⁹. Appare altresì accertato un solido contatto, attraverso il bacino padano, con il vasto ambiente etrusco. Il polo dell'Italia centrale diffonde anche all'interno della penisola, a Nord, verso l'area genovese e in direzione delle isole.

Un movimento più ampio di tecnici dello stesso ceppo, per via di mare, potrebbe aver raggiunto la Francia meridionale e l'area pirenaica.

La fase formativa della siderurgia europea non si esaurisce nel corso del I millennio a.C. La romanizzazione del Mediterraneo e dell'Europa provoca un'ulteriore diffusione delle conoscenze tecniche grazie a comunicazioni più facili e sicure e mercati di sbocco dei prodotti di portata continentale. In questo periodo è confermata la diffusione capillare della pratica dei trattamenti termici e della fabbricazione dell'acciaio¹⁰. In questa

⁴ Keesmann 1989, p. 99.

⁵ Ivi e Tylecote 1987, p. 77.

⁶ Forbes 1981, p. 605.

⁷ Ivi.

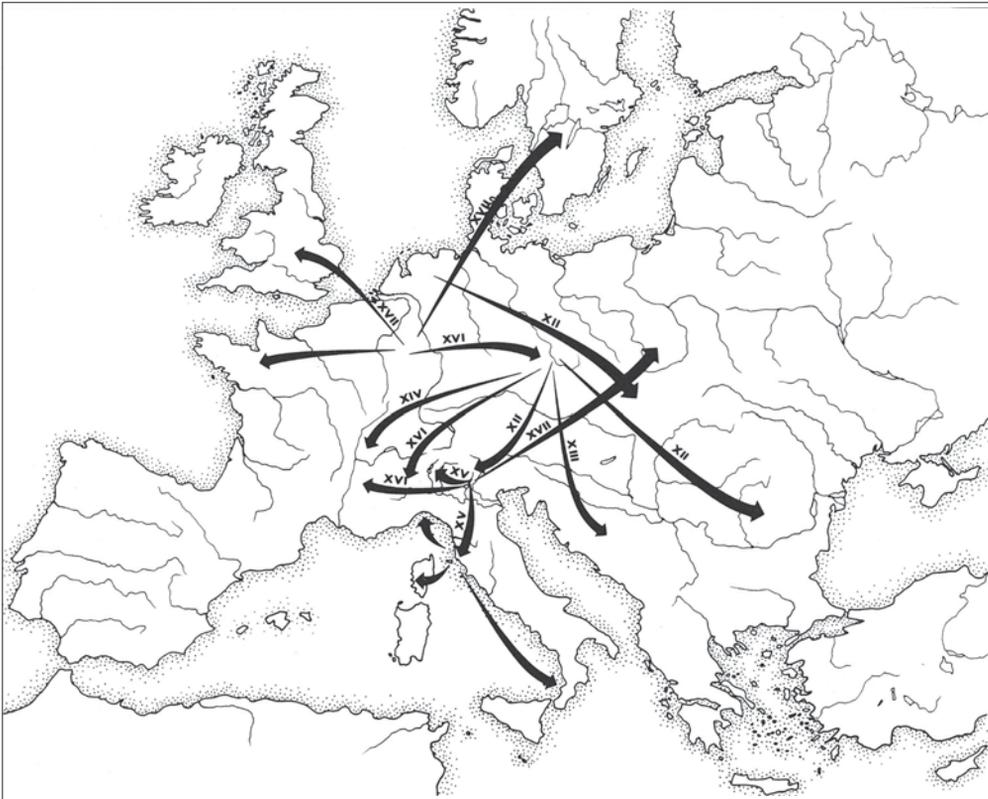
⁸ Ciò pare confermato dai contatti culturali di queste aree che si riscontra a partire dal Bronzo Finale - Prima età del Ferro. (v. Cima 2023, p. 131).

⁹ Negrone Catacchio 1979, p. 48.

¹⁰ Anche se Plinio il Vecchio decanta, ancora nel I secolo d.C. l'acciaio del Norico come prodotto ineguagliabile, abbiamo buone ragioni per credere che i principali processi di tempra e produzione dell'acciaio siano piuttosto diffuse sin dagli ultimi secoli del I millennio a.C.

fase si riscontrano attività siderurgiche molto diffuse in tutta Europa anche presso le piccole comunità rurali¹¹.

La caduta dell'Impero romano ad opera delle popolazioni germaniche frantuma l'unitarietà dell'economia europea e ciò influenza in maniera significativa anche i sistemi produttivi siderurgici. Gli invasori sono solitamente detentori di competenze tecniche importanti in questo campo e particolarmente per quanto attiene alla produzione di manufatti in ferro saldato a caldo per martellatura e per l'uso di metalli preziosi (oro e



Schema dei principali scambi tecnologici documentati tra i primari poli siderurgici europei.

argento) per impreziosire i manufatti in ferro con la tecnica dell'agemina¹². L'apporto germanico, giunto tardivamente rispetto alla diffusione della metallurgia nel continente europeo, lascia tracce significative soprattutto nella fabbricazione di manufatti particolarmente tenaci ma anche in campo minerario e nella metallurgia dell'argento. Se la metallotecnica antica del ferro è caratterizzata dal determinante apporto mediterraneo, quella altomedievale è dominata da un largo predominio germanico. Molto spesso la storiografia e la mitologia riferisce di monarchi medievali che favoriscono la metallurgia o riorganizzano antichi sistemi produttivi obsoleti e disarticolati. Quasi sempre il riferi-

¹¹ Cima 2024, p.190.

¹² Non a caso le principali innovazioni tecniche in campo siderurgico scaturiscono dall'ambiente tecnico-culturale germanico.

mento è al modello germanico e i tecnici su cui si basa l'azione signorile sono anch'essi di provenienza germanica¹³.

Le dinamiche che conducono al decollo tecnologico di questo immenso sistema centroeuropeo spesso sfuggono, ma pare scontato che anche il sistema tecnologico risenta di quei grandi sommovimenti e tensioni ideali che conducono i diversi popoli germanici alla conquista dell'Europa. In un'epoca in cui i grandi sistemi produttivi minerario - metallurgici romani sono caduti in rovina, ritorna il polo germanico a riproporre l'efficacia delle grandi concentrazioni, pure con nuovi modelli organizzativi. È questo il caso della siderurgia barbarica con tecniche di damaschinatura e di agemina dei manufatti in ferro.

Nel secolo XI risultano già importanti attività estrattive di minerali argentiferi a Freiberg in Sassonia¹⁴. Di qui parte un vasto movimento di colonizzazione mineraria che, nel volgere di un secolo, investe la Boemia, la Moravia, la Slesia e la Slovacchia, favorendo tra l'altro la germanizzazione di vasti territori slavi¹⁵. Questo fenomeno è contrassegnato dalla crescita delle città minerarie di Kuttenberg, Iglau, Schemnitz, Kremnitz, ecc. Queste nuove zone minerarie si aggiungono a quelle già note dell'Hartz, della Selva Nera e della Carinzia¹⁶. Si va così delineando il più vasto polo minerario - metallurgico europeo sotto forma di un grande triangolo con la base tra il Reno e il Weser e il vertice nei Carpazi¹⁷, ove si riscontrano coltivazioni di argento, rame, stagno, piombo, ferro, ecc. La forza e l'unitarietà di questa gigantesca diffusione risiede nella grande diaspora di tecnici che influenzerà fino alle soglie della nostra epoca quasi tutti gli altri distretti produttivi del continente. I dati sulla circolazione medievale dei minatori e dei metallurgisti tedeschi sono numerosi. Intorno alla metà del XII secolo il re d'Ungheria Geza II (1141-1162), chiama dei coloni tedeschi per riaprire delle miniere in Transilvania¹⁸. Così pare che i minatori di Zips in Slovacchia nella stessa epoca provenissero dalla foce del Reno o dalla Fiandra¹⁹. Dei coloni sassoni furono chiamati dal re Uros di Serbia all'inizio del suo regno (1243-1276). Nello stesso periodo gruppi consistenti di minatori e metallurgisti tedeschi sono presenti a Sud delle Alpi. Il vescovo Alberto e il suo successore Federico Wanga di Trento, tra il 1185 e il 1216, favoriscono a più riprese l'immigrazione di tecnici tedeschi nell'Altopiano del Calisio e in Val dei Mocheni²⁰. Tracce linguistiche della presenza tedesca sono attestate anche in Toscana, fin dai secoli XII e XIII, in vari documenti minerari di Massa Marittima, Siena e Montieri oltre che, con dovizia di particolari, negli statuti di Massa²¹. I minatori e metallurgisti tedeschi nella loro lenta diffusione giungono anche in Sardegna, ove sono attestati nel 1253

¹³ Fossier 1955, p. 344.

¹⁴ Vergani 1979, p. 55.

¹⁵ Ivi.

¹⁶ Ivi.

¹⁷ Ivi p. 56.

¹⁸ Gille 1969, p. 284.

¹⁹ Ivi.

²⁰ Vergani 1979, p. 55.

²¹ Ivi, p. 57. Gli statuti solitamente scoraggiano la circolazione dei tecnici ma ciò riguarda l'uscita e non l'ingresso.

nelle miniere di piombo e argento dell'Iglesiente²². Nel 1260 il conte di Savoia decide di impostare una politica mineraria e fa venire nei suoi stati numerosi minatori e metallurgisti dall'area germanica oltre Giura. Pochi decenni dopo si registra un'inversione di tendenza: nel 1289 affida a lucchesi e fiorentini tutte le miniere che saranno in grado di scoprire, imponendo loro la tassa del 33% sui metalli preziosi (oro e argento) e del 10% nel caso di altri metalli²³.

Tra la fine del XIV e il XV secolo, in Serbia vengono ripresi quelli che i documenti definiscono "regolamenti sassoni" con lo scopo di stilare leggi minerarie locali²⁴.

Nella prima metà del XV secolo dei minatori tedeschi rimettono in funzione la miniera di Jaques Coeur nel Lionese²⁵ e nel 1432 Enrico VI d'Inghilterra chiama dei tecnici dalla Boemia e dall'Ungheria. Lo stesso farà Ivan di Russia nella seconda metà dello stesso secolo²⁶.

Nel 1530 Carlo III di Savoia chiama dei minatori e fonditori tedeschi, a cui affida posti di responsabilità nell'amministrazione delle miniere statali²⁷. Forse legata allo stesso fenomeno è la presenza di minatori tedeschi nel polo produttivo canavesano di Brosso in provincia di Torino, ove un documento del 1655 riporta la presenza di una miniera definita "*Croso delli Allemagn*"²⁸.

Una serie notevole di testimonianze in merito alla presenza tedesca in Italia, riguarda l'area veneta del Vicentino, del Bellunese, del Cadore e della Carnia, ove nei secoli XV e XVI molti imprenditori che chiedono e ottengono investiture minerarie, o tecnici operanti, sia nelle miniere, sia nelle fonderie, risultano provenire dall'ambiente transalpino²⁹.

Per l'ambiente italiano Vergani propone due grandi ondate di immigrazione di tecnici germanici, identificabili nel lessico minerario e metallurgico³⁰. La prima si riscontra chiaramente in documenti e statuti dei secoli XII e XIII, relativi al Trentino, alla Toscana e alla Sardegna, ove termini tedeschi risultano adattati al latino³¹. La seconda ondata è collocabile nei secoli XV e XVI. Questo secondo ingresso risulta riconoscibile in numerosi prestiti tedeschi adattati ai dialetti veneti o alle loro corrispondenti versioni in vol-



Disegno tratto da una miniatura francese del 1270 raffigurante un mastro ferroio.

²² Vergani 1979, p. 57.

²³ Bautier 1960, p. 11.

²⁴ Gille 1969, p. 284.

²⁵ Ivi.

²⁶ Ivi.

²⁷ Gille 1969, p.284.

²⁸ Cima 1985, p. 9.

²⁹ Vergani 1979, p. 57.

³⁰ Frumento 1963, p. 31.

³¹ Ivi.

4. Circolazione dei tecnici e delle conoscenze

gare italiano³². Di queste ondate immigratorie di tecnici, particolarmente nell'ambiente italiano, sono piuttosto chiare le dinamiche grazie agli studi linguistici, ma spesso sfuggono le ragioni dei movimenti che peraltro vanno ricercate nell'intenzione dei principi di ammodernare i sistemi produttivi siderurgici in quanto strettamente legati alle capacità militari dello stato.

Trovando dei prestiti tedeschi in un substrato linguistico latino si è portati a credere che la presenza germanica sia il vettore di una tecnologia evoluta in un ambiente tecnico-culturale arretrato. Questa visione contrasta con i dati storico-archeologici che riportano l'ambiente italiano, e particolarmente quello delle valli bresciano-bergamasche, tra i contesti minerario-metallurgici del ferro più evoluti, proprio in corrispondenza delle fasi più intense del flusso migratorio in ingresso. Una spiegazione alternativa alla grande presenza di tecnici tedeschi nell'ambiente italiano, meno suggestiva, ma forse più verosimile, potrebbe essere quella di un sistema minerario - metallurgico italiano in grande attività ed espansione, tale da richiamare personale tecnico straniero al fine di far fronte alla grande crescita produttiva. A supporto di questa tesi, relativamente alla siderurgia, va considerata la grande fioritura dell'industria spadaria milanese o l'incomparabile ruolo del ferro e del minerale elbano e massetano nel Mediterraneo Centrale, che viene esportato e alimenta i sistemi produttivi di molte signorie della penisola. Analogamente significativi sono i riflessi della metallurgia nella vita culturale che nel corso del XV secolo conducono alla produzione dei principali trattati tecnici dell'epoca, tra i quali in particolare *De la Pirotechnia* di Vannoccio Biringuccio, *De Re Metallica* di Giorgio Agricola che, sebbene germanico, trova in Italia l'ambiente adatto alla pubblicazione del suo trattato, o Michele Mercanti con la sua *Metalloteca Vaticana*.

Il grande polo tecnologico delle Alpi centrali rappresenta la punta tecnologicamente più avanzata nel panorama siderurgico europeo medievale. Esso giunge molto presto a elaborare un sistema produttivo incentrato su un forno a manica più alto e largo, dotato di un ventre a sezione quadrata che funziona con il procedimento indiretto, in sostanza un altoforno, chiamato nei documenti "canecchio". Accanto a questo prende forma il "fuoco grosso bresciano" per l'affinazione della ghisa mediante rifusione, strutturato a pozzo, la cui forma è simile al basso fuoco catalano-ligure.

La comparsa di questa struttura produttiva non è chiara, ma già negli ultimi decenni del XIV secolo risulta sufficientemente diffusa nelle valli Camonica, Trompia e Sabbia e nei primi decenni del secolo successivo anche nel Comasco, nel Piacentino (Ferriere in Val di Nure) e nella Garfagnana.

L'intero distretto Bresciano - Bergamasco, parte integrante del Ducato di Milano, nel biennio 1426 - 28, passa nelle mani della Repubblica Veneta che ne incrementa notevolmente le attività³³. All'atto della conquista numerosi minatori e metallurgisti, forse compromessi con il vecchio regime, preferiscono l'esilio, trasferendosi massicciamente nel Comasco, ove intorno alla cittadina di Collio ristrutturano - potenziandola - un

³² Frumento 1963, p. 50.

³³ Ivi, p. 31.

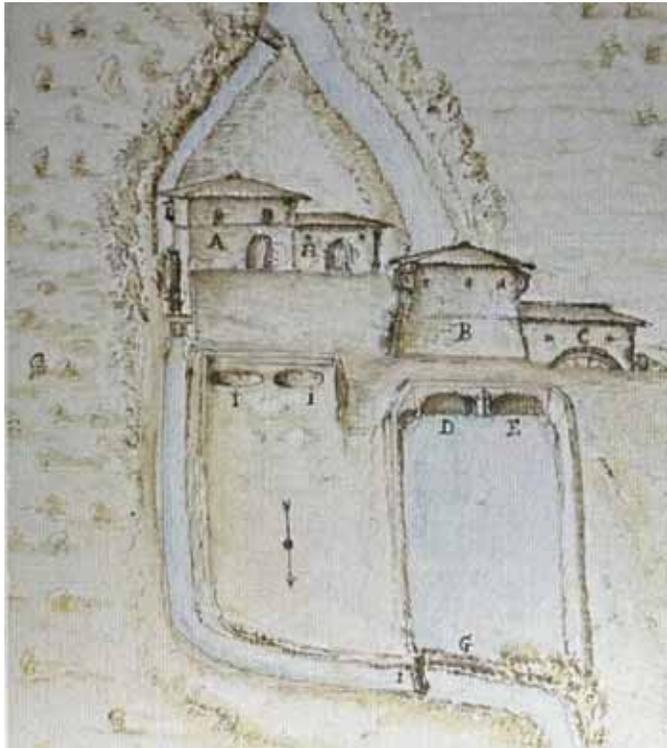
attività estrattiva e metallurgica preesistente³⁴. Tra le tante famiglie spicca quella degli Arrigoni che in breve tempo si trasforma nel motore di un consistente rinnovamento dell'industria siderurgica lariana. Nella seconda metà del XV secolo il nuovo distretto siderurgico con quello piacentino giunge a sostituire la produzione delle valli bresciane nei fabbisogni della fiorente industria spadaria milanese³⁵.

Nel primato del distretto Bresciano-Bergamasco relativamente alla messa a punto della tecnologia del "canecchio", non sembrano estranei apporti tecnologici ³⁶orientali, forse mediati dalla presenza veneziana in oriente dove da secoli giungevano le innovazioni tecnologiche del lontano Impero cinese.

A partire dal XV secolo³⁷ metallurgisti bresciani "esportano" il sistema presso altri distretti: in primo luogo nell'ambiente italiano, quindi in Francia e con buona probabilità anche in qualche ambiente produttivo tedesco.

Nel merito, l'azione più significativa riguarda la chiamata, intorno alla metà del XVI secolo, da parte di Cosimo I de' Medici di tecnici bresciani al fine di rinnovare la siderurgia toscana impiantando canecchi a Follonica e Cornia nel principato di Piombino³⁸. Pochi anni dopo (1561-62), altri tecnici provenienti dalla stessa area impiantano un canecchio a Fiumedinisi in Sicilia³⁹.

Nel 1581 una ferriera "bressana" di proprietà signorile è presente in Liguria lungo il torrente Sturia nell'entroterra di Chiavari, altre si trovano in Garfagnana nello stato di



Altoforno a carbone di legna (canecchio) in un disegno di Giovan Francesco Cantagallina del 1618. La struttura produttiva è riferibile all'azione dei tecnici bresciano-bergamaschi invitati in Toscana da Cosimo I de' Medici.

³⁴ Cima 1987, p. 217.

³⁵ Frumento 1963, p. 31.

³⁶ Wertime 1964, p. 391.

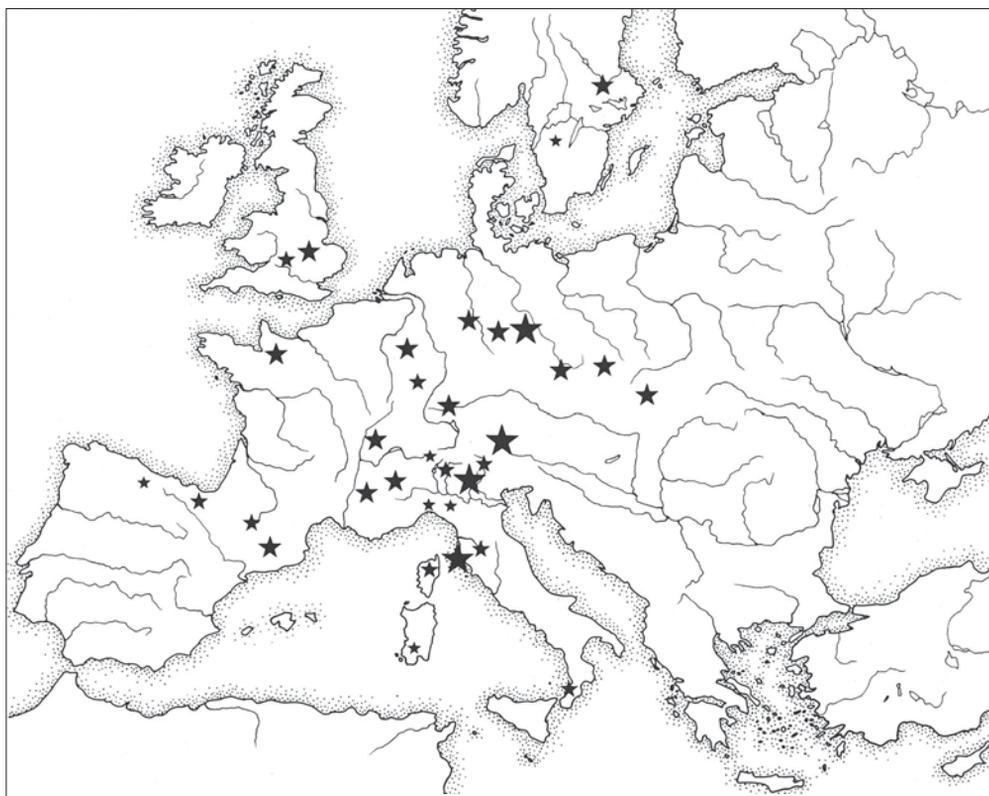
³⁷ Presenze significative del forno bresciano - bergamasco sono segnalate in quest'epoca in Toscana, in Liguria, nel Trentino e negli ambienti transalpini, particolarmente nel versante germanico delle Alpi. Un poco più tardi emergono le esperienze della Valle d'Aosta, del Delfinato, della Franca Contea.

³⁸ Morelli 1980, p. 500.

³⁹ Baraldi, Callegari 1991, p. 128.

Lucca e a Ferriere nel Reggiano, già alla fine del XV secolo. Questi sono soltanto alcuni dei tanti insediamenti produttivi fuori dall'area bresciano-bergamasca indotti dai famosi maestri itineranti provenienti dalle Alpi Centrali: i "pratici". A partire dalla seconda metà del XVI secolo gli impianti divengono via via più numerosi, soprattutto nell'ambiente italiano e in quello della Francia sud-orientale⁴⁰.

Nell'Italia Centrale e nelle Alpi Occidentali la tecnologia del cannechio soppianta progressivamente quella del forno a manica sulla spinta delle mutate esigenze produt-



Principali poli produttivi siderurgici dell'Europa occidentale.

tive indotte da un mercato del ferro sempre più attivo ed esigente.

Un interessante caso di trasferimento di tecnici dell'area bresciano - bergamasca su vasto raggio è del 1610, quando i due fratelli Caccia provenienti da Bergamo impiantano a Bobrza vicino a Cracovia in Polonia un cannechio e diverse fucine⁴¹ introducendo in questa lontana terra la nuova tipologia di forno e distinguendosi nella produzione di armi da fuoco. Nello stesso secolo forni alla bergamasca sono impiantati, per iniziativa signorile o di singoli metallurgisti intraprendenti⁴² per sfruttare le ricche miniere

⁴⁰ Nel secolo compreso tra la metà del XVI e la metà del XVII risultano impianti di cannechio in Toscana, in Piemonte, in Liguria e nel Delfinato, oltre che nelle aree classiche delle Alpi Centrali.

⁴¹ Mjczulski, Nosek 1991, p. 184.

⁴² Nicco 1987, p. 9.

valdostane e del Delfinato, dove concorrono al rinnovamento dell'obsoleta industria siderurgica locale⁴³.

Nel XVIII secolo si trovano impianti di forni a canecchio anche nel Giura Vodese, nella Franca Contea, nei Vosgi, nelle Ardenne⁴⁴ e in tutti i distretti austriaci e della Germania Meridionale. Una diffusione di questa tecnologia verso la Svezia da parte dell'ambiente tedesco, ormai caratterizzato dall'impiego dell'altoforno a sezione quadrata di derivazione italiana, è confermata tra la fine del XVI e l'inizio del XVII secolo. Nel 1595 i due fratelli Besche⁴⁵, originari di Liegi, costruiscono una fucina a Forsmark presso il Mar Baltico. Pochi anni dopo, nel 1604, in seguito al trattato di Norrköping, la tecnologia dell'altoforno tedesco viene importata in Svezia insieme con numerosi tecnici. L'acquisizione tecnologica più consistente è ascrivibile alla metà del secolo a cura dell'industriale siderurgico Louis de Geer che è responsabile del trasferimento in Svezia di numerosi tecnici valloni con le loro famiglie⁴⁶.

Alla fine del XVII secolo il canecchio e le sue varianti rappresentano la struttura materiale di altoforno a carbone di legna più diffusa in Europa.

Nel corso del secolo XVII il grande polo vallone elabora una variante dell'altoforno a sezione quadrata producendone uno a sezione circolare di maggiore resa e questa realizzazione rappresenta un punto di svolta fondamentale.

Dopo il 1650 numerosi tecnici valloni migrano nella regione di Wetzlar⁴⁷ e la presenza, sin dal XVI secolo, di un altoforno a sezione circolare con profilo a doppio tronco di cono in Boemia, pare confermare una diffusione tecnologica del polo belga verso i distretti orientali⁴⁸ ancora solidamente legati alla vecchia struttura del canecchio. Sebbene più efficace, il forno vallone non soppianta quello bresciano - bergamasco. Le tecnologie costruttive convivono come due varianti dello stesso sistema.

L'organizzazione della siderurgia europea viene sconvolta in modo radicale con la grande crescita della seconda metà del XVIII secolo. Questa fase segna il tramonto della tecnologia bresciano - bergamasca del canecchio che viene progressivamente soppiantata dall'altoforno a carbone di legna con il ventre a sezione circolare, di maggior resa, che risulta derivare quasi in maniera diretta dal sistema belga. Questa nuova struttura sin dai primi decenni del XVIII secolo viene esportata in Gran Bretagna, Normandia e Scandinavia. Pochi anni dopo inizia una lenta diffusione anche verso Sud ed Est, nel grande interland germanico⁴⁹.

Elaborazioni locali del forno vallone, particolarmente per quanto attiene al profilo a sezione circolare del ventre, conducono alla definizione di una famiglia di altiforni molto simili che, a seconda dell'area di provenienza, vengono di volta in volta definiti

⁴³ Leon 1960, p. 28.

⁴⁴ Aa.Vv 1988, p. 57.

⁴⁵ Krulis Randa 1967, p. 247.

⁴⁶ Ivi.

⁴⁷ Ivi, p. 248.

⁴⁸ Ivi.

⁴⁹ Tylecote 1966, p. 89.

4. Circolazione dei tecnici e delle conoscenze

“contese”, “svedese”, “norvegese” o “inglese”⁵⁰.

Il processo di rinnovamento dei numerosi distretti europei è lento e le testimonianze dello stato di crisi in cui versano gli antichi sistemi basati sulle diverse varianti del canecchio, con il ventre a sezione quadrata, sono numerose.

Lo stato generale della siderurgia delfinese viene diligentemente censito nel 1779 dal cavalier Grignon⁵¹. Le principali strutture produttive risultano ancora legate al canecchio. Lo stesso Grignon con Carlo Giuseppe Binelli, ispettore delle miniere di Francia, non risparmia tentativi per migliorarne lo stato. I due convergono sull'opportunità di impiantare affinerie carinziane, in luogo dell'obsoleto fuoco grosso bresciano, poiché in grado di fornire produzioni più consistenti e di migliore qualità metallotecnica⁵².

Anche nel Giura e nella Franca Contea alla fine del XVIII secolo sono ancora in funzione alcuni altiforni a sezione quadrata di tipo bresciano-bergamasco⁵³, benché ormai largamente sostituiti dalle strutture a sezione circolare indotte dal vicino distretto vallone. A partire da questo polo i forni circolari vengono introdotti nel Delfinato e nel distretto canavesano nel corso degli anni 1790 dai fratelli Gaspere e Baldassarre Mongenet de Renancour, imprenditori particolarmente fortunati in terra italiana⁵⁴.

Dalla Gran Bretagna, solitamente arretrata in campo metallurgico, intorno alla metà del XVIII secolo, arriva l'innovazione tecnologica destinata a sconvolgere profondamente la geografia dell'industria siderurgica. Si tratta di un altoforno del tipo vallone in grado di funzionare a carbon fossile. Questa nuova tecnologia a partire dalla seconda metà del Settecento si diffonde in Europa e in meno di un secolo soppianta le consolidate strutture a carbone di legna⁵⁵.

⁵⁰ Frumento 1963, p. 147.

⁵¹ Leon 1960, p. 50.

⁵² Ivi.

⁵³ Pelet 1978, p. 72.

⁵⁴ Cima 1984, p. 17.

⁵⁵ Schubert 1976, p. 104.

5. NOTE DI DIRITTO MINERARIO

Lo studio dei codici minerari e degli statuti costituisce un ulteriore elemento d'indagine che concorre a favorire una più completa comprensione dei fenomeni storico-archeologici.

Il fiorire delle attività minerario - metallurgiche in età Romana conduce alla formazione di un diritto minerario complesso atto a regolare le attività produttive e il loro inserimento in seno alla complessa macchina burocratica statale.

I primi fondamenti della legislazione mineraria emergono proprio nel mondo romano, sebbene qualche labile testimonianza rimandi addirittura al mondo greco. Interessanti suggestioni della "*Lex Metallis*", di cui si ha traccia nella tradizione, derivano dall'archeologia. Sono infatti note molte iscrizioni che richiamano la legge, ma i riferimenti più singolari emergono dalle tavole scoperte ad Aljustrel in Portogallo, note come "tavole di Vipasca" o "leggi di Vipasca"¹.

Le due tavole contengono il regolamento di una "societas" che gestisce le miniere. Esse offrono un quadro suggestivo della normativa sul lavoro minerario e, sebbene indirettamente, forniscono precisi riferimenti alla "*Lex Metallis*" dei tempi di Adriano ².

Dall'analisi del testo emerge il principio fondamentale del diritto romano secondo il quale il sottosuolo appartiene allo stato, che concede a singoli privati o a "societas" la possibilità di estrarre i minerali in cambio del pagamento di un diritto pari alla metà del valore del minerale estratto.

Nelle tavole si legge che un concessionario ha il diritto di scavare cinque cavi di assaggio, ma avendo trovato un buon filone in uno di questi non può abbandonare il lavoro negli altri sotto pena di perderne il diritto futuro a cavare i quei luoghi. Diritto che a sua volta può passare ad altri purché riprendano il lavoro entro 25 giorni dalla data della nuova assegnazione. Ne consegue che un concessionario ha a disposizione un tempo massimo di 25 giorni per incominciare i lavori, e in un altro capitolo emerge che il tempo massimo di sospensione dei lavori in un cavo già avviato è di 10 giorni, dopo di che si perde il diritto allo sfruttamento. Molti dei paragrafi contenuti nelle due tavole distinguono tra minatori schiavi ("*damnati ad metalla*") e minatori liberi salariati ("*mercenarii*"), che a partire dal II secolo d.C. risultano molto diffusi in tutto il contesto minerario romano. Entrambe le figure devono svolgere indifferentemente i lavori per i quali sono incaricati, siano essi l'estrazione, lo scavo delle gallerie, la cernita, la flottazione o altri trattamenti del minerale.

La presenza di condannati nelle miniere sembra derivare dalla tradizione, come paiono dimostrare alcuni frammenti di età Ellenistica riferibili alla miniera di Nubia Africa.

Tra i dati più rilevanti risulta che i minatori liberi possano sfruttare per conto loro le

¹ Forbes. 1962, p. 54 e Mrozek 1989, p. 164.

² Mrozek 1989, p. 164.

scorie del minerale trattato estraendone il minerale residuo, semplicemente pagando una sorta di diritto alla società per l'uso dei mezzi di produzione.

La prima tavola informa anche sulla presenza di soldati nel distretto minerario. Blasquez Martinez ipotizza che nelle miniere importanti e soprattutto in quelle d'oro, fosse di stanza una coorte inviata per presidiare il territorio, ma anche per vigilare sui condannati. La pratica del presidio militare è già in uso nel periodo ellenistico dove nella miniera di Nubia, per vigilare sui condannati al lavoro in miniera e nelle strutture connesse, risultano impiegati dei soldati barbari che addirittura parlano una lingua diversa e quindi sono nell'impossibilità di comunicare o fraternizzare con i condannati³.

Le tavole di Vipasca riportano le pene per i ladri di minerale. Se si tratta di schiavi, questi vengono flagellati, messi ai ferri e venduti senza che possano rimettere piede in una miniera, mentre se sono liberi la pena consiste nella confisca dei beni e nell'interdizione perpetua al lavoro in miniera. La stessa pena colpisce i minatori liberi che per negligenza non provvedano a rinforzare adeguatamente le gallerie o non si adoperino per costruire i canali di scarico dell'acqua.

Un paragrafo dedicato al funzionamento dei bagni fornisce un'idea del turno di lavoro nella miniera che deve essere di circa nove ore, dalla seconda ora (5,30 circa) all'ottava (14,30 circa).

Una norma della seconda tavola prevede il divieto di trasportare il minerale alle "*officinae*" durante la notte (dal calare, al levar del sole). Ciò probabilmente per impedire o limitare i furti.

Altre norme riguardano la sicurezza. Il sesto paragrafo della seconda tavola si preoccupa del rinforzo delle gallerie e proibisce di smontare i pilastri di legno che reggono l'intelaiatura.

La grande innovazione dell'età Romana riguarda il sistema di gestione dei centri minerari in funzione della legislazione mineraria. Soprattutto per quanto riguarda il ferro, a partire dall'epoca di Traiano l'amministrazione dello stato dispone di "*procuratores ferrarium*" che nella loro qualità di funzionari imperiali assicurano l'esazione delle imposte.

Sablayrolles ha studiato quest'organizzazione per la Gallia⁴ e riferisce che a capo del servizio era posto un procuratore dal rango di centurione con sede a Lione. Egli crede che questo ufficio dipendesse direttamente dallo "*Statio Ferrarium Ostiensis*" che era l'ente centrale deputato all'amministrazione delle miniere e della produzione del ferro.

Fino all'epoca di Traiano le miniere vengono condotte da grandi imprenditori, ma già intorno agli anni 105 -110 sembra che vengano trasferite a un sistema di gestione statale, anche se probabilmente ciò riguarda soltanto le miniere più importanti, e per molto tempo si troveranno a coesistere il sistema pubblico e una miriade di piccoli centri estrattivi detenuti dai privati.

I codici medievali, sebbene affondino le radici nel diritto romano, rimandano a una

³ Blasquez Martinez 1989, p. 119.

⁴ Sablayrolles 1982, p.1837.

consistente elaborazione dei singoli ambienti culturali, ove quelli di ceppo germanico e slavo occupano un posto di primo piano.

Dall'analisi dei documenti, pare potersi escludere un'influenza diretta del diritto romano su quello medievale. Uno dei discriminanti fondamentali è il diritto regale sul sottosuolo e sui suoi prodotti, tipico della legislazione romana, che nel Medioevo appare molto attenuato. Esso viene ripreso, come principio generale, nell'enunciazione della Dieta di Roncaglia (1158) che pone le miniere tra le "regalie"⁵. Ciononostante, occorre



Il giudice delle miniere legge l'editto e i minatori giurano di rispettarlo, 1530 circa (Disegno a penna e inchiostro su carta). La scena si riferisce al centro minerario di La Croix-aux-Mines nei Vosgi ed è contenuta nei fogli 1v e 2r del libro di disegni di Enrich Gross. L'ambiente minerario è impostato su un grande batolite ricco di galena argentifera e altri minerali, ove si è sviluppato un complesso sistema di gallerie sin dal Medioevo.

attendere il XV secolo per avere una legge mineraria regale, promulgata dal re di Francia e applicata, non senza difficoltà, soprattutto nel caso dei giacimenti di ferro⁶.

Di fatto, numerosi sovrani nel corso del Medioevo, probabilmente consci dell'impossibilità di esercitare il diritto regale sulle miniere, scendono a compromessi con le comunità in via di emancipazione. Si assiste così alla cessione del diritto di cava del solo minerale di ferro, meno nobile e di conseguenza meno degno di appartenere alla "regalia", ma allo stesso tempo più facile a essere ridotto in metallo e quindi più adatto a essere trattato in piccole strutture produttive che non richiedono impianti

⁵ Pene Vidari. 1989, p. 23.

⁶ Gilles. 1962, p. 242.

della foresta dell'Othe. Il delfino Giovanni II che nel 1315 concede privilegi della stessa natura alla comunità di Allevard (Delfinato)¹⁰. Infine i duchi di Savoia che nel 1395 concedono agli uomini di Brosso (Canavese) di cavare i minerali di ferro nelle miniere della valle, al termine di una sanguinosa rivolta detta dei Tuchini, forse causata proprio dai dissidi circa le miniere¹¹.

L'affermazione delle Comunità nei secoli XIII e XIV coincide con la completa appropriazione, anche sul piano legale, delle miniere e la conseguente promulgazione di statuti e regolamenti minerari in tutta Europa, che solitamente prescindono dal diritto regale¹².

I regolamenti minerari più importanti sono quelli di Freiberg (Sassonia), Iglau (l'attuale Jhlava in Moravia), quelli di Küttemberg (Germania) e Massa Marittima (Italia Centrale). Accanto a questi vanno ricordati i regolamenti di Trento (Alpi orientali italiane), della fine del Duecento, quelli di Schemintz (Ungheria), promulgati da Bela IV (1235 - 1270) e quelli di Kremnitz, oggi perduti ma collocabili nell'intervallo 1307 - 1342. Parimenti vanno citati i regolamenti serbi confermati dai sovrani ottomani alla fine del XIV secolo e quelli di Alvard del 1395¹³.

Tra le leggi citate la più antica è il regolamento di Iglau, del 1249, noto come codice di Venceslao, sistematicamente ripreso nelle leggi minerarie tedesche e, dato il ruolo egemone che questo ambiente produttivo assume nel medioevo, i principi giuridici di questo regolamento sono confluiti nei numerosi codici minerari di tutta l'Europa. Di poco successivi al codice di Venceslao sono gli Statuti Minerari duecenteschi di Trento, quelli di Massa Marittima (Toscana) del 1325 e quelli di Villa di Chiesa (Iglesias) in Sardegna, a cui seguono tutti gli altri di area germanica¹⁴.

La grande presenza di tracce del diritto tedesco nei codici minerari europei non va enfatizzata oltre misura. In meno di un secolo i principali distretti minerari d'Europa si dotano di statuti e regolamenti e ciò coincide con un'ondata diffusiva del sistema minerario germanico, particolarmente verso gli ambienti italiano e slavo in grande attività, ma ciò non significa automaticamente subalternità degli altri sistemi produttivi rispetto a quello tedesco¹⁵. Viceversa le radici, pure lontane, del diritto romano sempre presenti nella legislazione mineraria medievale definiscono in maniera chiara il ruolo motore dell'area mediterranea.

Con l'evolvere della società medievale e l'organizzazione di stati centrali forti e burocratizzati, il diritto comunitario diviene inadeguato. Si assiste così all'acquisizione nel diritto regale dei tratti essenziali dei regolamenti minerari delle comunità. Il primo esempio è francese: nel 1413 Carlo VI di Francia con un editto¹⁶ pone ordine nel farraginoso

¹⁰ Gille 1968, p. 101.

¹¹ Venesia 1979, p. 25.

¹² Gilles. 1968, p. 105.

¹³ Gilles. 1962, p. 99. Quasi sempre i regolamenti medievali riprendono antiche consuetudini.

¹⁴ Vergani. 1979, p. 27.

¹⁵ Ivi, p. 57.

¹⁶ Gille 1968, p. 113.

sistema minerario-metallurgico francese. Ciò rappresenta un fatto di grande rilievo poiché dimostra come le problematiche relative alla normativa abbiano ormai travalicato le dimensioni strettamente locali dei territori comunali e quindi abbiano assunto rilevanza nazionale. Nello stesso secolo numerosi stati europei si dotano di leggi analoghe. Uno di questi è la Repubblica di Venezia che legifera nel 1488. Nei “*Capitoli et ordini minerall*” della Repubblica Veneta promulgati il 13 maggio¹⁷, è chiaro un riferimento ai codici tedeschi. Il rimando è in apertura: «*Per ovviar a molti inconvenienti et scandali, che ogni zorno occorreva per le buse, et miniere d'Alemagna, tra coloro che cavava, et lavorava dette buse, et miniere fu posto li ordeni, et capitoli infrascritti, contignudi, li quali per esser stati da tutti li signori laudati, et approbati, sono stati universalmente da tutti, et in cadun luogo, che si lavora miniere osservadi...*». Come si può notare anche le leggi di uno stato potente come la Repubblica Veneta citano la consuetudine germanica alla stregua dei regolamenti comunitari. Le differenze tra gli uni e le altre risiede nel diverso peso economico e sociale che la metallurgia riveste in uno stato del XV secolo.

L'analisi comparata dei diversi statuti e delle leggi minerarie, anche le più antiche, dimostra sorprendenti collegamenti tra comunità di minatori e metallurgisti distanti anche migliaia di chilometri e questa è la testimonianza più tangibile dell'osmosi culturale indotta dalla circolazione dei tecnici¹⁸.

La struttura essenziale di ogni corpus riguarda pochi punti fondamentali. Anzitutto una serie di privilegi riservati alla comunità o al distretto, con rigide norme protezionistiche e indicazioni sui diritti di cava e le conseguenti tassazioni che le comunità impongono, quasi sempre in natura¹⁹. Una caratteristica generale di ogni regolamento è quella relativa alla proprietà del suolo che non interferisce sul diritto di cavare nel sottosuolo.

La normativa spesso tocca anche le modalità di estrazione: quando si può cavare, come occorre segnalare o identificare il proprio cavo o miniera, le distanze da rispettare e quali sono le tecniche di estrazione consentite e proibite. Ciò soprattutto in relazione all'uso del fuoco in miniera. In molti casi è stabilita una stagionalità che definisce un'integrazione del sistema produttivo con il substrato rurale²⁰. Spesso si riscontrano norme che regolamentano la modalità di scavo delle gallerie. Un articolo dei privilegi di Allevard proibisce di scavare nella direzione in cui si è sentito lavorare altri minatori. Così, se scavando una galleria si arriva a un cavo antico occorre astenersi dal modificarlo. In questo caso la normativa garantisce una specie di diritto a continuare lo sfruttamento del filone a coloro i quali avevano costruito la miniera più antica²¹.

In qualche caso la normativa diviene dettagliata fino a comprendere un calcolo molto complesso dei costi di estrazione, come nel caso dei privilegi di Allevard nel

¹⁷ Della Fratta Montalbano 1678, p. 163.

¹⁸ Forbes 1962, p. 54.

¹⁹ Gille. 1968, p. 118, Frola 1918, p. 351, Della Fratta Montalbano 1678, p. 163.

²⁰ Ivi.

²¹ Dureault 1961, 166. Nei contesti minerari aperti alle comunità spesso le interferenze tra diversi cavi di estrazione sono causa di gravi liti.

Delfinato del 1315. Qui si concede di estrarre i minerali richiedendo unicamente una tassa di un quarto del cavato, calcolato dopo aver prelevato una quantità di minerale pari al valore del salario degli operai, delle candele impiegate per illuminare i cavi, del costo della riforgiatura dei picconi e dei sacchi mediante i quali il minerale viene estratto dalle gallerie²². In altri casi, come negli statuti di Massa Marittima, la normativa è talmente precisa da giungere alla definizione delle singole operazioni che compongono il processo produttivo, fino al controllo della qualità del prodotto²³, garantendo così una



Lavoro in una carbonaia, 1530 circa (penna e inchiostro su carta). La scena è riferita all'ambiente dei Vosgi ed è contenuta nei fogli 21v e 22r del libro di disegni di Enrich Gross.

specie di marchio di qualità.

Singolare appare la normativa contenuta nei regolamenti di Allevard del 1395, che riprendono i privilegi del 1315, dove è stabilito il nutrimento di diritto dovuto ai minatori: «*six mineurs doivent avoir un banal de vin et demy et un quarteron et demy de fromage ... et la valeur de six livres de jambon. Item des chandelles autant qu'il en serai necessaire*»²⁴.

I casi di estensione delle norme contenute nei codici minerari alla metallurgia sono numerosissimi. Infatti gli statuti tendono a considerare in maniera unitaria, sia l'estrazione dei minerali, sia la loro lavorazione. Gli statuti di Brosso in Canavese del 1602

²² Dureault 1961, p. 164.

²³ Garbaglia, Panella 1938, p. 64.

²⁴ Dureault 1961, p. 166.

impongono una sorta di protezionismo verso le fucine proibendo a «*detti ferrarii andar servire a fusine forastiere sinché prima le suddette del finaggio di Brozo et Lezulo, da detti particolari di Brozio possedute, siano provviste di mastri ferrarii a luoro necessarii*»²⁵.

L'accettazione e il rispetto degli statuti e delle leggi minerarie da parte degli operatori, siano essi semplici minatori o proprietari delle miniere, avviene in forma solenne mediante giuramento pubblico prestato avanti testimoni e autorità.

In qualche distretto particolarmente esteso come quello dei Vosgi, nel Medioevo il diritto minerario costituisce un corpus a sé stante che viene amministrato autonomamente da un giudice minerario appositamente designato²⁶.

Nel corso del Medioevo si assiste anche a un'evoluzione importante dello sfruttamento minerario. Nelle fasi più antiche si registrano essenzialmente singoli proprietari di miniere che impiegano dei servi e in qualche caso forse dei salariati. A partire dalla seconda metà del XV secolo si assiste al progressivo recupero delle forme romane di gestione delle "*societas*", dove i diversi soci hanno gli stessi diritti e gli stessi doveri²⁷. Si tratta delle consorterie molto diffuse in tutta l'Europa tardo-medievale.

Un altro settore rigidamente regolamentato è quello della produzione del carbone di legna indispensabile per la conduzione dei forni di riduzione del minerale in metallo, per l'affinazione della ghisa e per le fucine, secondo modalità pianificate dalle autorità comunali o feudali. Per l'approvvigionamento della legna nei boschi comunali o signorili i carbonai ottenevano l'autorizzazione a tagliarla e trasformarla in carbone (sia secco che verde), pagando un censo. Il segreto produttivo era la materia prima cioè la legna, ma soprattutto la modalità di governo del fuoco nella carbonaia. La legna utilizzata era sempre quella raccolta nei mesi invernali. Il regime del legno nei feudi e nelle "*comunie*" (terre comunali) era rigidissimo e si arrivava a gravi ammende e addirittura all'arresto contro chiunque se ne appropriasse senza autorizzazione. I boschi signorili spesso erano tutelati da guardie armate, le quali agivano addirittura contro chi si limitava a raccogliere qualche ramo secco per uso domestico ma il carbone per uso metallurgico deve essere di qualità elevata²⁸.

²⁵ Frola 1918, p. 63.

²⁶ Fluck 1982, p. 88.

²⁷ Dureau 1961, p. 165.

²⁸ Il carbone migliore è quello ottenuto da legni di alberi cosiddetti "forti", ovvero faggio, quercia e più raramente castagno o conifere. Per gli impieghi in siderurgia si preferiva il carbone di faggio e nocciolo perché bruciando dava fiamma chiara e consentiva al metallurgista di stimare a vista le temperature dei metalli in base al colore che questo assumeva durante la fase di riscaldamento.

6. L'ESTRAZIONE DEI MINERALI

L'abitudine di estrarre materiali dal suolo per produrre dei manufatti affonda le radici nella più antica storia dell'uomo.

I primi esempi di cava di materiali da destinare alle attività artigianali risale al Paleolitico Superiore, quando l'uomo nella sua maturazione culturale impara a selezionare i litotipi e giunge a produrre i primi strumenti di pietra. Insieme con le tecniche costruttive egli affina una spiccata capacità selettiva sui materiali che la natura offre. Per un lungo periodo di tempo questa capacità si estrinseca unicamente nella selezione di materiali litici da destinare alla produzione di strumenti e attrezzi, mentre la cava di minerali o rocce tenere per la produzione di pitture è assai probabile, ma scarsamente documentata prima del tardo Paleolitico medio 70 - 50.000 BP.

Gli strumenti in selce scheggiata o in pietra verde levigata sono i primi prodotti che l'uomo ha tratto dalla terra selezionando con grande accuratezza il materiale. Analoghe considerazioni si possono fare per la terra cotta dove la lavorazione successiva alla cava dell'argilla è particolarmente significativa e l'impiego del fuoco diviene fondamentale nella realizzazione del manufatto.

La scoperta della metallurgia apre un'epoca nella quale le attività di ricerca mineraria e di cava si intensificano e vengono messe a punto delle tecniche specifiche per l'estrazione dei minerali e per il loro trattamento mediante il fuoco al fine di ottenere il metallo.

La sequenzialità della scoperta del metallo rispetto a quella della terra cotta non è casuale. Nella metallurgia sono facilmente riscontrabili molte delle tecniche che l'uomo neolitico ha messo a punto per produrre le meravigliose terre cotte che caratterizzano il Neolitico.

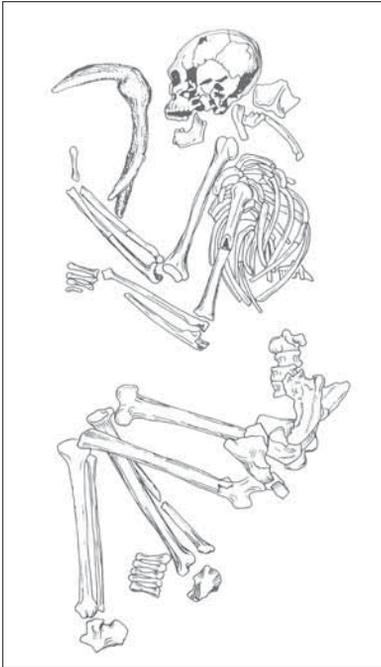
La scoperta della metallurgia apre un'epoca nella quale le attività di ricerca mineraria e di cava si intensificano e vengono migliorate le tecniche di estrazione e i metodi produttivi. I minerali vengono cavati indifferentemente a cielo aperto o in miniera. Tecniche di scavo di pozzi e cunicoli, noti già nel Neolitico, vengono perfezionate. In antico si riscontra lo scavo del giacimento mediante una sequenza di pozzi e cunicoli che seguono le vene di minerale più ricco e abbondante. A partire dall'età Romana compaiono le prime miniere organizzate ove è chiara l'azione di ingegneri per la tracciatura e il governo delle attività di scavo. In questi casi viene affrontato anche il problema dell'estrazione dell'acqua che solitamente invade gli scavi e quello della ventilazione con la costruzione di camini di aerazione. In ogni caso questi esempi, nell'antichità, sono isolati. Occorrerà attendere il tardo Medioevo per riscontrare in maniera diffusa sistemi di canalizzazioni e complicati meccanismi a pompe.

L'ambiente di miniera pone anche il problema dell'illuminazione che i minatori di tutte le epoche hanno risolto con l'impiego di lampade a olio di varia natura e candele:

in terra cotta, pietra e metallo, con grande abbondanza delle prime, soprattutto per quanto attiene all'età Romana e al Medioevo.

6.1 Preistoria, Protostoria ed età Ellenistica

In Europa sono note una decina di miniere sotterranee di selce attribuibili al Neolitico¹. In quella di Rijckholt presso Maastricht in Olanda, recenti studi hanno consentito di



Scheletro di un minatore neolitico rinvenuto accanto al piccone in corno di cervo a Obourg in Belgio, perito per il crollo del cavo di miniera dove stava cavando noduli di selce.

rilevare ben 66 pozzi² verticali, scavati nel Neolitico, per attraversare uno spesso strato di sabbia, fino a raggiungere una bancata calcarea contenente filoni ricchi di noduli di selce. La datazione ottenuta con il metodo del C14 sulla base di carboni raccolti nel riempimento di uno dei pozzi ha fornito la data di 3159 ± 160 a.C.³. I minatori neolitici, alla base dei pozzi, hanno scavato ampie gallerie orizzontali per seguire i filoni contenenti i noduli di selce entro i quali si sono rinvenuti gli strumenti di scavo rappresentati da picconi in corno di cervo e asce litiche in pietra scheggiata⁴.

Una seconda testimonianza della tecnica di estrazione neolitica deriva da Obourg in Belgio, ove risulta documentata anche la prima sciagura mineraria che la storia dell'uomo conosca. In uno dei cunicoli il crollo del soffitto ha travolto un minatore in cerca di selce e il suo corpo carboni è rimasto conservato per millenni accanto al piccone in corno di cervo che stava usando per scavare la galleria⁵.

Miniere di selce neolitiche ben documentate si trovano anche a Saint-Michel in Lorena, ove lavori di sbancamento hanno mostrato la presenza di una fitta rete di gallerie e pozzi scavati nelle alluvioni quaternarie⁶.

Nel corso del III millennio a.C. nel continente europeo si diffonde la metallurgia del bronzo che provoca il consolidamento delle tecniche produttive del rame. In questo contesto molte comunità umane imparano a riconoscere i minerali, a cavarli e a ridurli in metallo e con questo produrre attrezzi e strumenti di grande valore. Dopo una prima fase formativa, l'attività metallurgica diviene un'occupazione di rilievo economico

¹ Bosch 1979, p. 100.

² Ivi.

³ Ivi, p. 104.

⁴ Ivi, p. 108.

⁵ Bromehead 1961, p. 200.

⁶ Guillome 1986, p. 75. In questi contesti ancora oggi sono presenti bancate con molto minerale di ferro.

legata al largo diffondersi dei manufatti in bronzo presso le comunità umane. Il cambiamento non riguarda soltanto l'introduzione del metallo, bensì molti aspetti della vita quotidiana e più in generale il quadro di relazioni all'interno delle comunità, secondo dinamiche non sempre facili da comprendere. L'unico elemento certo è che singoli oggetti di rame arsenicale entrano a far parte dello strumentario già presso le popolazioni tardo-neolitiche. Questo fenomeno non va inteso come un fatto isolato nel quadro delle conoscenze tecniche bensì un'evoluzione complessa la cui introduzione induce



Strumenti da minatore preistorico (mazze, picconi e asce litici), rinvenuti nelle indagini archeologiche alla Grotta della Monaca - Calabria. (Da Breglia et al.).

(A lato) Veduta aerea della miniera di rame di La Torquesa (Tarragona - Spagna) coltivata durante l'antica e media età del Bronzo. (Da Rafel et al.).



un complicato quadro di conoscenze tecniche volte a estrarre i minerali dalla terra

e a produrre il metallo attraverso un complesso procedimento. Questo è il sintomo più tangibile delle profonde trasformazioni culturali che conducono a nuovi e più ampi equilibri nella vita delle comunità, favorendo la formazione di una forte classe egemone.

I dati disponibili per questo periodo sono molto scarsi e non è possibile tracciare un quadro concreto delle metodologie e delle tecniche impiegate, né della distribuzione delle attività minerario-metallurgiche sul continente.

Nell'Europa antica le prime esperienze di estrazione dei minerali per un impiego metallurgico datano al IV millennio a.C. quando, con una certa rapidità, nel continente si diffonde la metallurgia del rame.

Dei numerosi poli minerario-metallurgici legati al rame che durante il III e il II millennio a.C. alimentano importanti attività produttive non ci sono pervenute che modeste testimonianze. Da segnalare Rudna Glava lungo il tratto danubiano iugoslavo, La Torquesa presso Terragona nella Spagna mediterranea⁷, Aljustrel in Portogallo, diverse località della Sardegna, il Norico nelle Alpi orientali e la Cornovaglia e i poli dell'Etruria

⁷ Nuria et al. 2018, p. 8.

(Campiglies e Massetano). Altre miniere di rame europee che presentano evidenze materiali analoghe a quelle citate si trovano nella Spagna meridionale (Chinflon), in Irlanda (Mount Gabriel), in Austria (Mittemberg), ad Ai Bunar (Bulgaria), oltre a quella di Kozlu nella Turchia centrale. Di queste, soltanto Rudna Glava, Ai Bundar e Chinflon sono calcolitiche, mentre le altre si collocano, in fasi imprecisate dell'età del Bronzo⁸.

Una delle più antiche miniere di rame note è quella di Rudna Glava in Jugoslavia⁹. Qui si sono scoperti più di 20 pozzi che seguono le vene di malachite azzurrite e



Placca corinzia di VI secolo a.C. con la raffigurazione di un cavatore di argilla. La tavoletta conferma l'uso di picconi nell'attività di cava analoghi a quelli impiegati nelle miniere di minerali metallici.

calcopirite, talora intersecandosi. All'interno si sono trovate delle opere di sostegno delle pareti realizzate mediante muri in pietra connessa a secco e grandi quantità di vasi, talora ancora interi, attribuibili alla cultura di Vinča (IV-III millennio a.C.), oltre a resti di focolari e attrezzi di scavo. Tra questi, picconi in corno di cervo e mazze in pietra legate con corregge¹⁰, e immanicate, come quelle rinvenute a La Turquesa.

La tecnica di cava, ricostruita sulla base delle evidenze materiali rinvenute prevede lo scavo di pozzi e gallerie, spesso comunicanti, che costituiscono al contempo cavi di estrazione e camini per la circolazione dell'aria. In base agli studi degli ultimi decenni i siti minerari preistorici europei, soprattutto quelli di minerali di rame, si sono moltiplicati offrendo un panorama piuttosto articolato. Oltre all'impiego di mazze e picconi litici, nell'attività di cava in qualche caso è attestato l'uso del fuoco, come risulta dalla tradizione antica. Quando la circolazione dei fumi e il tiraggio sono stabiliti vengono accesi grandi fuochi contro le pareti da cavare, arroventandole. Raggiunta una temperatura elevata vengono bruscamente raffreddate con getti di acqua fredda trasportata dall'esterno mediante vasi di terra cotta o sacche di cuoio e ciò provoca delle fessurazioni sulla base del brusco raffreddamento e forse del cambiamento di stato allotropico del metallo in esse contenuto. Questo sistema consente ai minatori di frangere più facilmente la vena e cavarla con semplici strumenti manuali¹¹. In presenza di tecniche di cava così sofisticate è probabile l'impiego di sistemi di aerazione delle gallerie mediante fuochi accesi alla base dei camini¹² che, creando una forte corrente ascendente, risucchiano aria fresca

⁸ Jovanovic 1980, p. 99 e Forbes 1981, p. 582.

⁹ Forbes 1981, p. 581.

¹⁰ Jovanovic 1980, p. 84.

¹¹ Ivi, p. 97 e Clark 1955, p. 285.

¹² Bromehead 1961, p. 567. Per questo nei cavi meglio organizzati vengono predisposti appositi cunicoli in grado di creare correnti per garantire il ricambio dell'aria all'interno delle miniere.

dall'esterno consentendo il ricambio. Il tiraggio delle gallerie stimolato dall'accensione di fuochi, con lo scopo di meglio aerarle, risulta largamente praticato in molti distretti minerari anche in epoca relativamente recente.

Il ferro, sebbene noto sin dal III millennio a.C. nell'area anatolica, non viene prodotto in maniera significativa fino agli ultimi secoli del II millennio a.C.¹³. Maggiore diffusione nell'attività mineraria si riscontra a partire dai primi secoli del I millennio a.C. quando nel Mediterraneo e nel continente europeo si propaga l'impiego di questo metallo. I minerali di ferro sono più facilmente reperibili, data la maggiore diffusione dei giacimenti e la sua produzione metallurgica è più semplice, non richiedendo la formazione di una lega con un altro metallo difficilmente reperibile come lo stagno, benché la temperatura di fusione sia notevolmente più alta di quella del rame e del bronzo.

Le miniere di ferro proto-storiche sono estremamente diffuse in molti ambienti d'Europa, Medio Oriente e Africa settentrionale¹⁴ e le ricerche archeologiche talora informano circa le tecniche di escavazione, anche se non è normalmente agevole identificare cavi così antichi.

Durante il I millennio a.C. alle mazze e picconi litici si sono sostituiti strumenti metallici, soprattutto in ferro, come illustra la suggestiva tavoletta in terracotta fittile corinzia di VI secolo a.C. che mostra minatori in atto di scavare con il piccone in un cavo di miniera, mentre altri raccolgono il cavato in un panierino e lo trasferiscono all'esterno. Una lampada pende al centro della figurazione illuminando l'ambiente¹⁵, dove si vede una parete sottoescavata e nell'altra, fortemente inclinata, è ricavata una scala. Una seconda immagine di minatore è contenuta in una tavoletta fittile greca dipinta, ancora di VI secolo a.C., raffigurante un uomo in atto di lavorare con il piccone una parete quasi verticale¹⁶ ma trattandosi di una serie di tavolette illustranti le tecniche di produzione e cottura dei vasi, verosimilmente si tratta dell'attività in una cava di argilla.



Tavoletta in terracotta corinzia rinvenuta a Penteskouphia datata 575 - 550 a.C. raffigurante schiavi al lavoro in una miniera la cui illuminazione è garantita dalla lampada che pende al centro della raffigurazione. I minatori sono mostrati nudi come avverrà ancora in certi contesti minerari nel corso del XX secolo. (v. p. 16).

¹³ Forbes 1981, p. 581.

¹⁴ Pauli 1983, p. 269.

¹⁵ Bromehead 1962, p. 2 e, Mondini 1973, p. 200.

¹⁶ Bromehead 1962, p. 5.

6. L'estrazione dei minerali

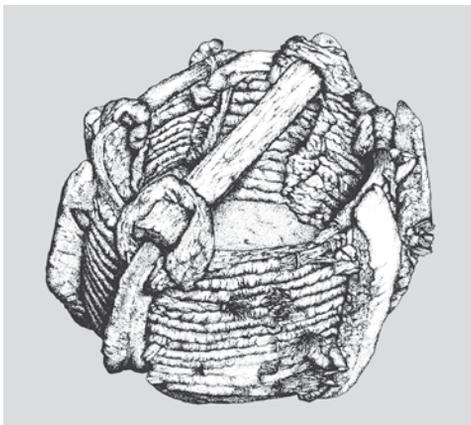
Ancora dal mondo greco, due monete di Damastione nell'Epiro¹⁷, informano sull'importanza delle pratiche minerarie, recando su una delle facce l'immagine del piccone da minatore. Testimonianze materiali di questi attrezzi sono fornite da Plainer che pubblica picconi, mazzuoli e cunei provenienti da diversi siti della Grecia Antica.

Anche i mezzi per il trasporto del minerale sono documentati. Il sito protostorico di Hallstatt in Austria ha restituito un documento materiale relativo alle coltivazioni della miniera di salgemma attribuibile al Bronzo Finale e alla prima età del Ferro, consenten-



Galleria di miniera di età Romana di Rosia Montana in Transilvania (Romania).

(Sopra a lato) Gerla rinforzata da aste lignee dell'età del Ferro per il trasporto del salgemma cavato in miniera da Salzberg (Austria).



(Sotto a lato) Cesto di legno e corde per il trasporto del minerale di età Romana da Aljustarel (Spagna).

do di ricostruire, oltre agli strumenti di cava costituiti da diversi picconi in bronzo, anche le gerle rinforzate con elementi in legno e le sacche in pelle per evacuare il minerale¹⁸. Si tratta di strumenti per il trasporto piuttosto diffusi di cui vi sono tracce in diversi contesti, anche con dimensioni considerevoli che non potevano essere mossi da un unico addetto, destinati a equipaggiare i sistemi di sollevamento mediante i verricelli.

¹⁷ Mondini 1973, p. XLV.

¹⁸ Kramer 1983, p. 125 e 140.

6.2 Il mondo Romano

Il mondo romano, come già osservato, è un grande produttore e consumatore di metallo. Le tracce delle attività minerarie di questo periodo sono frequenti in tutto il continente.

L'impulso alle attività minerarie deriva dagli enormi quantitativi di metallo consumati dall'esercito che per la prima volta nella storia si trasforma in una poderosa arma offensiva corazzata.

Il rafforzamento del sistema estrattivo è alla base di un grande incremento della produzione metallurgica e ciò viene continuamente favorito dall'amministrazione dello stato che sempre più spesso si preoccupa di fornire manodopera alle miniere, talora attingendo ai prigionieri di guerra con intere tribù deportate o alla grande massa di reclusi, oltre naturalmente agli schiavi già largamente impiegati durante la Preistoria e la Protostoria. È questo il caso dei già citati "*damnati ad metalla*" di cui ricorrono numerosi riferimenti legislativi di età Imperiale, al cui proposito vale ricordare il provvedimento dell'imperatore Costantino che vieta di inviare i condannati ai cruenti giochi nel circo per destinarli al lavoro in miniera¹⁹.



Cestone minerario per il sollevamento e il trasporto del minerale cavato, datato al I secolo d.C. da Mazarron - Murcia (Spagna).

Accanto a questo lavoro servile in tutta l'età imperiale si registra la presenza di professioni libere che talora è difficile comprendere in maniera completa. Si tratta probabilmente di salariati capaci di organizzare e dirigere il lavoro minerario. Dati riferibili alla Dacia inducono a presumere per questi salariati liberi una "*merces*" abbastanza rilevante di 5-7 assi al giorno²⁰. Tra le diverse presenze che si registrano negli ambienti minerari romani ricorrono in maniera costante i soldati che hanno il compito di mantenere l'ordine pubblico e di vigilare sulla massa di schiavi.

Le informazioni storiche e archeologiche riportano a una tecnologia minerario-metallurgica sofisticata che suggerisce la presenza di genieri capaci di costruire apparati

¹⁹ Bromehead 1962, p. 7

²⁰ Ivi, p. 8. Nella media dei compensi dell'epoca, questa tariffa è da considerare piuttosto rilevante.

6. L'estrazione dei minerali

minerari complessi e sistemi di scorrimento delle acque per drenare i cavi e per condurre l'acqua di lavaggio dei minerali.

Un notevole esempio della tecnologia mineraria romana è quello della miniera di rame di Rio Tinto in Spagna, dove otto coppie di ruote a cassette del diametro di quasi 5 m furono impiegate per sollevare l'acqua di circa 30 m. Una simile strutturazione richiedeva un'elevata capacità di scavo di gallerie, pure con tecniche essenzialmente manuali²¹.



(Sopra) Lampada mineraria fenicia.

(A lato) Placca in terracotta istoriata con scena di minatori muniti di picconi da Linares presso Castulo (Spagna).

Il principale attrezzo impiegato era il piccone. Molti di questi, ancora con il manico di legno, attribuibili al I - II secolo d.C., sono stati recuperati in Spagna in una miniera di Linares²². Si tratta di strumenti con penna e battente, doppia penna, oppure di zappe. Il complesso di strumenti trova corrispondenza con analoghi manufatti rinvenuti a Mendip in Gran Bretagna²³.

Un documento archeologico interessante, scoperto al sito minerario di Mazarron (Murcia, Spagna), inquadrato al I secolo d.C.²⁴, consiste in un cestone in legno e fibre intrecciate con manico trasversale, di sagoma sostanzialmente cilindrica, adatto a essere trasportato a mano, per la movimentazione del minerale cavato²⁵ e forse anche per il sollevamento mediante un verricello.

Un bassorilievo proveniente da Linares nell'alta valle del Guadalquivir, mostra una squadra di minatori tra cui uno recante un piccone, molto simile a quelli rinvenuti nelle gallerie, un secondo quella che appare una lampada e l'uomo un po' discosto a tergo, un lungo paio di tenaglie da fabbro e una seconda lampada²⁶.

Nelle miniere romane, come in quelle più antiche, è probabile che venisse impiegato il fuoco per surriscaldare le masse rocciose e quindi ottenerne la fessurazione con getti

²¹ Bromehead 1962, p.8.

²² Ivi, p. 9.

²³ Ivi e p. 10.

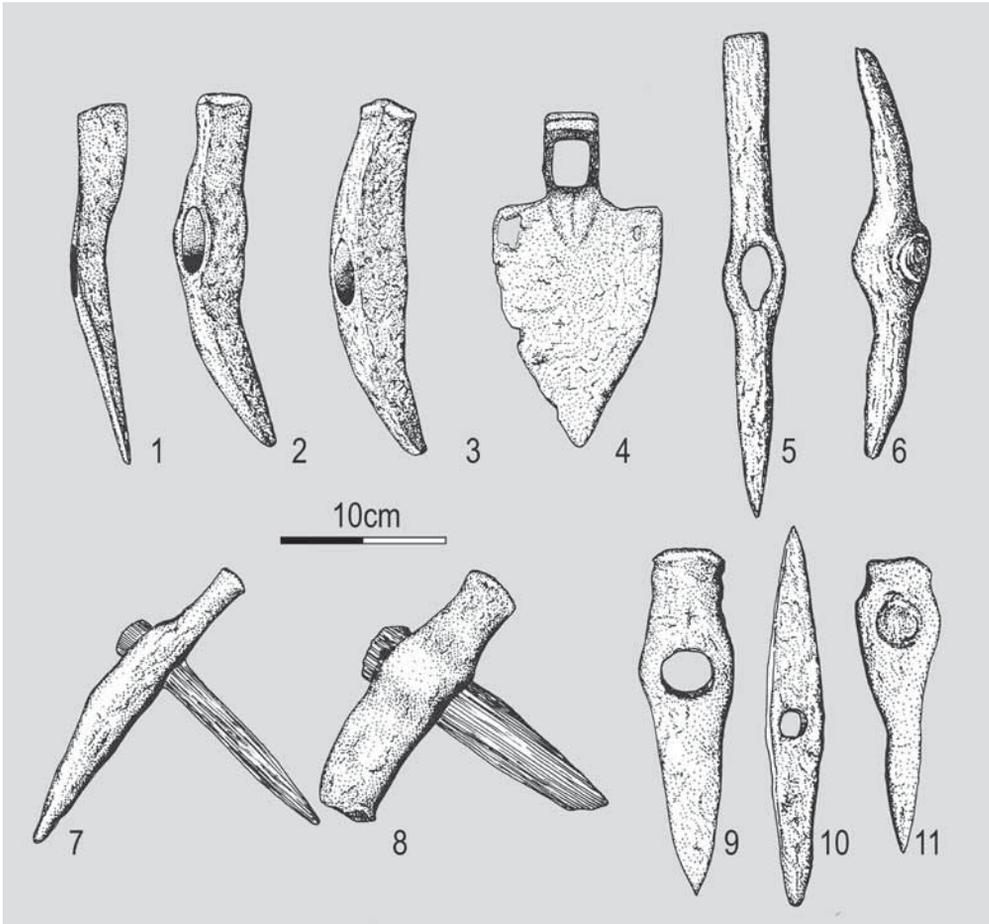
²⁴ Il cestone era forse utilizzato per il sollevamento del minerale da un pozzo mediante un verricello.

²⁵ White 1986, p. 115.

²⁶ Bromehead 1962, p. 10.

d'acqua, come sembrano attestare i rinvenimenti di Rudna Glava in Jugoslavia. L'uso dell'aceto, riferito da Strabone, era forse alternativo all'acqua nel brusco raffreddamento delle parti surriscaldate col fuoco, con il duplice vantaggio di essere refrigerante e corrosivo, ma soltanto nel caso di roccia incassante di natura calcarea, sebbene non sembri giustificata la spropositata differenza di prezzo²⁷.

Un interessante documento minerario tardo-romano si trova a Wallerfangen nella Sarre e riguarda un'iscrizione parietale sulla roccia accanto all'imbocco della galleria



(Sopra) Attrezzi da minatore di attribuzione romana o altomedievale. 1,2,3 da località imprecisate della Francia; 4,7,8, 9, 10,11 dalle miniere di Linares in Spagna; 5, 6 da Mendip in Gran Bretagna.

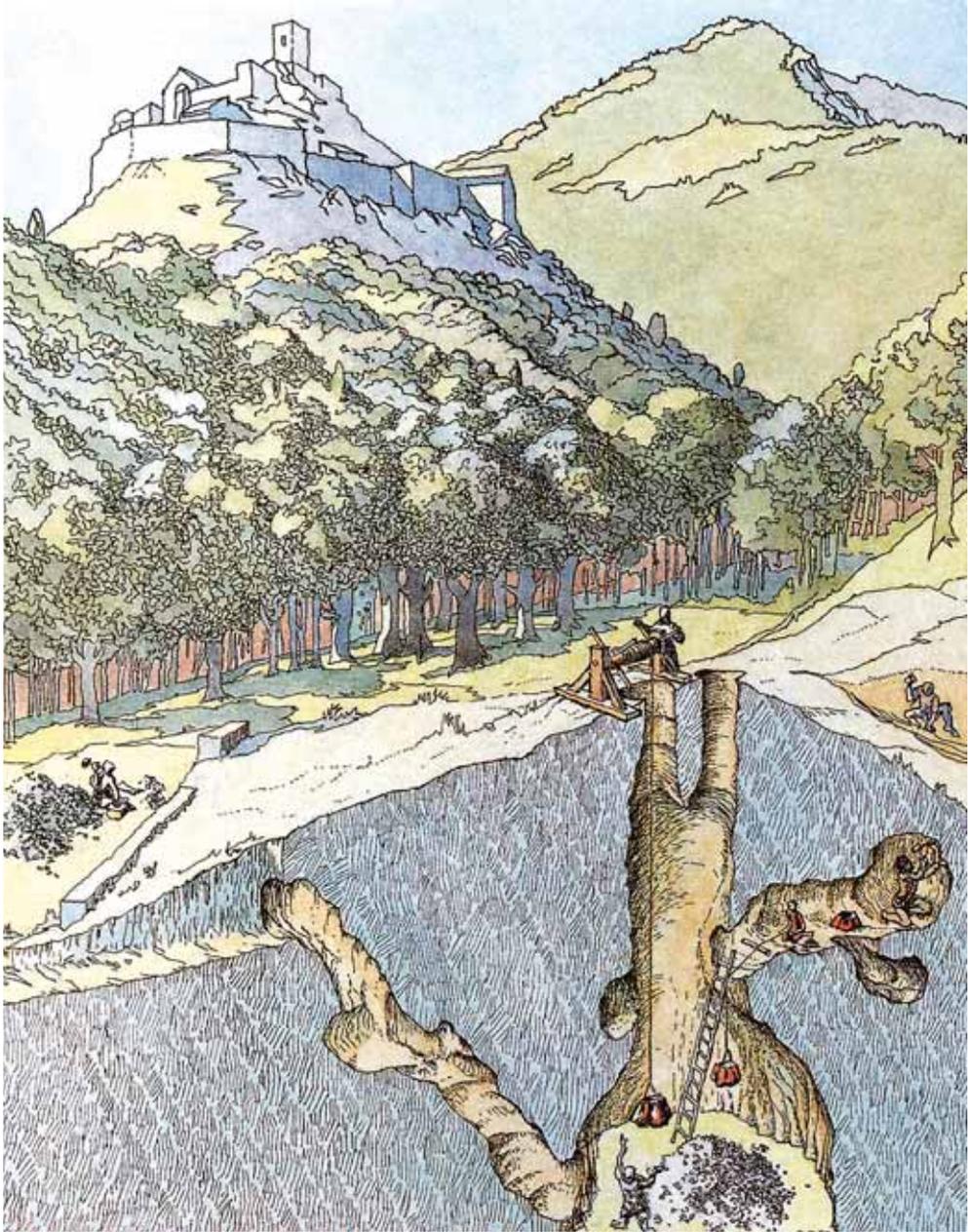
ove si legge: “*INCEPTA OFFICINA EMILIANI NONIS MART*” (il 15 marzo Emiliano ha aperto questa galleria)²⁸ Iscrizioni di questo genere erano obbligatorie all'imbocco delle gallerie di miniera e servivano ad indicare la proprietà e la data di avvio della coltivazione. Documenti analoghi sono presenti anche all'isola d'Elba.

Tra le coltivazioni a cielo aperto, di particolare rilievo sono quelle nei depositi auriferi

²⁷ Bromehead 1962, p. 7.

²⁸ Cuppers 1983, p. 108.

6. L'estrazione dei minerali



Disegno ricostruttivo di una miniera medievale di rame della valle del Manienti. In alto Rocca San Silvestro (Campiglia Marittima - Toscana). Oggi il villaggio è abbandonato e completamente decaduto ma nel corso del Medioevo fu un importante centro metallurgico per l'estrazione dei minerali di rame e la relativa metallurgia. Riccardo Francovich nel corso di diverse campagne di scavo ha studiato, sia il contesto minerario, sia quello metallurgico, costituito da piccole e piccolissime strutture produttive collocate a ridosso dell'abitato confermando la distribuzione capillare delle fonderie. In basso a sinistra area di frantumazione del minerale e muro di contenimento dei detriti estratti accanto al tratto di coltivazione superficiale. A destra il pozzo di entrata alla miniera con il verricello per la risalita del minerale. Nel sottosuolo il camerone e i cunicoli di cava. (Da Francovich 1988).

alluvionali, realizzate per colluviamento artificiale di grandi quantità di deposito. Un sistema di questo tipo attribuibile all'età Romana è stato studiato a Ruina Montium nella regione di Leon in Spagna²⁹.

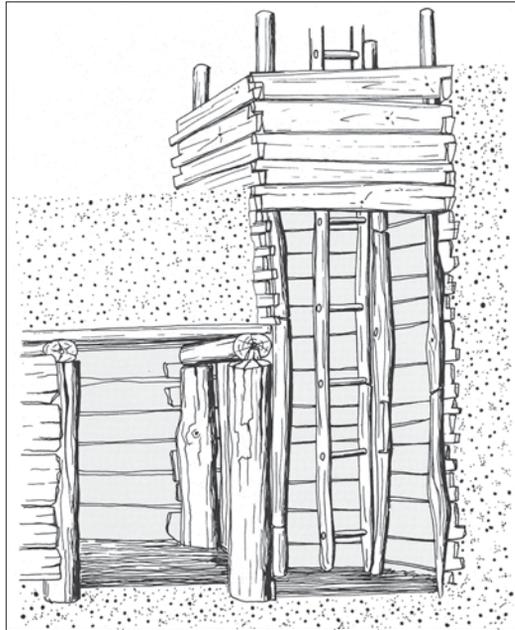
Jacques Ramin ha misurato le dimensioni di alcuni degli enormi sistemi di cavi lasciati dalle miniere romane per rendere conto dell'attività di scavo. Egli si riferisce in particolare a quelle di rame, argento e oro della penisola Iberica, a Montalto e Serra da Caveira in Portogallo e di Centenillo, Rio Tinto e Marza in Spagna, dove annota cavi residui di circa 500 m di diametro e 100 di profondità³⁰. Quanto alle forme delle gallerie egli rileva solitamente sezioni geometriche quadrate, rettangolari o trapezoidali, con dimensioni comprese tra 0,7 e 1,2 m di larghezza e tra 1 e 1,8 m di altezza, i pozzi sono solitamente quadrangolari con dimensioni che vanno da 1,9 x 1,3, fino a 2 x 1,9 m.

6.3 Medioevo e Rinascimento

Le miniere medievali, pure largamente presenti in numerosi distretti del continente europeo, non hanno fornito evidenze analoghe a quelle del mondo romano.

Bertand Gille, analizzando i documenti anteriori al XII secolo propone che uno dei metodi di coltivazione principalmente impiegati nel Medioevo, per l'estrazione dei minerali di ferro, fosse quello a cielo aperto. Lo stesso autore analizzando oltre 25 regolamenti o leggi minerarie riguardanti i principali distretti europei, conclude che lo sfruttamento in galleria fosse generalmente praticato per le miniere di rame e argento e piombo o per quelle di sale. Tra le miniere di ferro a cielo aperto cita alcuni esempi francesi nei Pirenei, nel Delfinato e nella Champagne³¹. Numerose miniere a cielo aperto sono note anche nell'arco alpino³².

I dati per l'alto Medioevo sono molto scarsi, da un lato perché i mercati richiedono una minore quantità di ferro e dall'altro perché i grandi impianti di coltivazione, cresciuti durante l'età Romana, decadono. La prova più consistente risiede nella grande scarsità



Rilievo della ricostruzione con reperti originali del fondo di un pozzo di miniera con l'attacco della galleria orizzontale. XIV - XV secolo da Rudabanya nei Carpazi (Ungheria) - Museo Nazionale di Budapest.

²⁹ Cauvet 1987, p. 87.

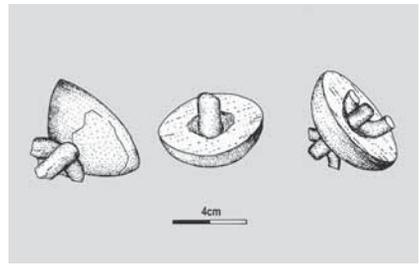
³⁰ Ramin 1987, p. 46.

³¹ Gille 1969, p. 287.

³² Cima 2019, p. 82.

6. L'estrazione dei minerali

di metallo tipica dei secoli dell'alto Medioevo, sia del ferro, sia per il rame e i metalli preziosi. I grandi distretti minerari sono generalmente abbandonati o drasticamente ridotti a piccole aree di coltivazione, sia per il collasso dei mercati dovuto al generale degrado dell'ambiente sociale e culturale, sia per la mancanza di organizzazioni conseguenti all'estinzione delle "societas" organizzate dai grandi imprenditori minerario-metallurgici romani. Il fenomeno di impoverimento della società altomedievale è generalizzato. In tutti i campi i processi produttivi più complessi si perdono, mentre normalmente quelli



Pompa a bozzoli o "a Pater Noster" azionata manualmente dal De Re Metallica di Giorgio Agricola. (A. Travi; B. Caviglie; C. Timpano dentato; D. Timpano di fuso; E. Timpano di spranghe.

(A lato) Bozzoli di una pompa medievale per l'estrazione dell'acqua da una miniera dell'Iglesiente conservati al Museo dell'Istituto di Istruzione Superiore di Iglesias (Sardegna).

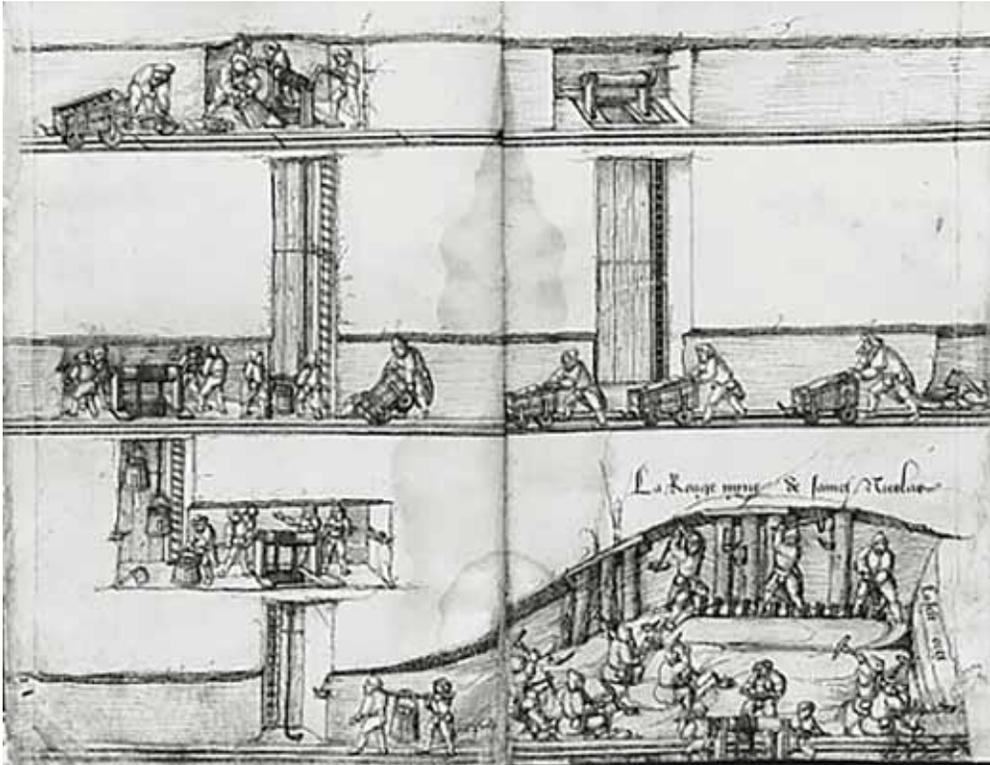
metallurgici sopravvivono in vaste aree vicine ai centri di estrazione ad opera dei metallurgisti che si disperdono in seguito al collasso delle grandi organizzazioni produttive. Tra questi la metallurgia del ferro si mantiene integrandosi con i contesti rurali, come attività secondaria, solitamente con capacità produttive molto contenute e funzionali ai bisogni locali.

Occorrerà attendere il Basso Medioevo o addirittura i primi secoli dell'età Moderna per ritrovare grandi distretti minerari coltivati in maniera intensiva con rilevanti impianti in galleria, paragonabili a quelli attivi in età Romana.

Per larga misura le miniere medievali sono degli stretti cunicoli che procedono secondo la distribuzione del giacimento. Come già documentato nella Preistoria, anche nel Medioevo si devono registrare disgrazie di natura mineraria. Una di queste è citata da Pietro il Venerabile priore di Domène, divenuto poi abate di Cluny. Egli nel "*Liber de miraculis*" riferisce di un fatto avvenuto prima del 1122, ove un contadino «*intima terrae*

viscere fidando» venne sepolto dal crollo di una galleria e salvato miracolosamente molto tempo dopo dai suoi compagni³³.

Il metodo di cava ampiamente sperimentato sin dalla Preistoria non pare modificato in maniera significativa durante il Medioevo. Accanto agli strumenti a mano, i minatori medievali impiegano ancora il fuoco, come i loro predecessori pre- e protostorici. Una delle testimonianze più tarde è contenuta nei “Capitoli et Ordini minerali” della Repubblica Veneta del 1488 i quali dedicano un apposito capitolo all’uso del fuoco³⁴



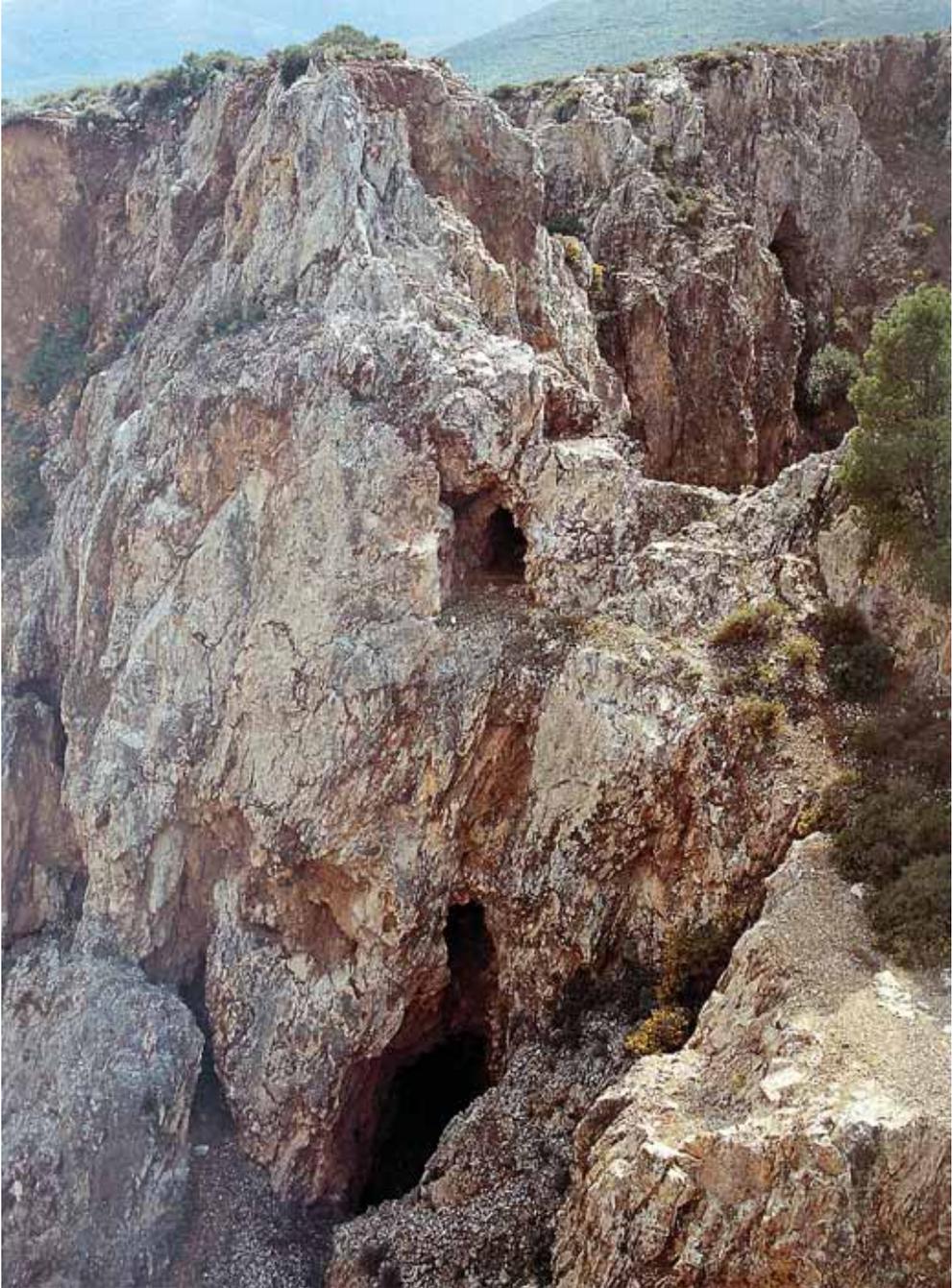
Sezione della miniera di argento di Saint Nicholas a La Croix-au-Mines Nei Vosgi (Francia) fogli 26v e 27r del libro di disegni di Enrich Gross (prima metà XVI secolo), dove si vedono i pozzi con i verricelli di estrazione e le gallerie percorse dai carrelli per la movimentazione del cavato.

nelle miniere, stabilendo che dalla festa di San Michele alla festa di San Giorgio si possa impiegare il fuoco unicamente di notte a partire da mezz’ora prima del tramonto, mentre d’estate il fuoco può essere usato soltanto di giorno. Ciò per evitare ammorbamenti dell’aria nell’area delle miniere nella stagione solitamente dedicata alla cava dei minerali.

Il Medioevo è avaro di documenti iconografici relativi alle attività minerarie. Una delle prime rappresentazioni riguarda l’iniziale di un manoscritto miniato castigliano del XIII secolo, che mostra un minatore in atto di frangere la roccia con martello e scalpello assistito da un tecnico che analizza il cavato.

³³ Gille 1968, p.24 e Bromehead 1962, p. 13.

³⁴ Della Fratta Montalbano 1678, p. 163.



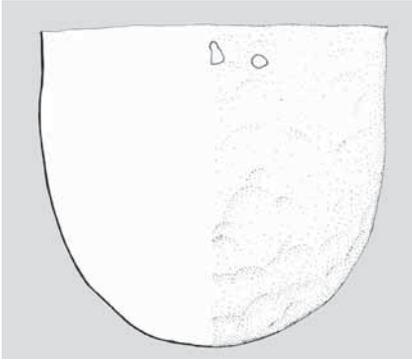
Gallerie di miniera medievali a Monteponi nell'Iglesiente (Sardegna) sezionate dagli scavi minerari ottocenteschi.

Un quadro interessante e preciso delle tecnologie minerarie impiegate in questo periodo è fornito dai testi e dai documenti iconografici basso medievali³⁵. Questi si accompagnano alle opere di maggior respiro tecnico del Cinquecento, tra cui, oltre

³⁵ Gille 1969, p. 279 .

ai trattati universalmente noti *De la Pirotechnia* e *De Re Metallica* o la Metalloteca Vaticana, anche i disegni d'Heinrich Gross riferibili alla miniera di Saint Nicolas a La Croix-aux-Mines nei Vosgi lorenesi o le miniature del Graduel di Saint Dié conservato nella Biblioteca Municipale della stessa città³⁶. Quest'ultimo riporta immagini di cavaatori in atto di frangere la roccia con l'impiego di un punteruolo immanicato e martello.

Lo strumentario che si desume da queste fonti conferma, nella sua struttura essenziale, quello già in uso nelle miniere romane. La base è quella del piccone a penna con



Contenitore in rame di una pompa a secchie pescanti rinvenuta in una miniera dell'Iglesiente (Sardegna).

(A lato) Pompa a secchie lignee pescanti azionata da una ruota idraulica dal De Re Metallica.



battente, del martello, della mazza e della zappa³⁷. Accanto a questi strumenti si notano anche le leve e i lunghi punteruoli che il Biringuccio mostra con adeguate protezioni per le mani³⁸. Sono inoltre presenti le vanghe e uno strumento ad una sola penna molto acuminata che l'Agricola chiama "marra".

Gross in una illustrazione dell'ingresso della miniera di Saint Nicolas a La Croix-aux-Mines (Vosgi), mostra una folta schiera di minatori con attrezzi di scavo e lampade, tra le quali alcune con lunghe aste ricurve per essere appese al soffitto³⁹. In un'altra si vedono dei carpentieri muniti di asce, anch'essi con le lampade a olio portate a mano. Si tratta degli addetti alla costruzione delle travature e dei pilastri di rinforzo delle gallerie (v. p. 105).

Agricola, Biringuccio e Gross mostrano delle attrezzature per il trasporto del minerale consistenti in vari panieri di vimini o legno e borse di cuoio con i manici del tutto simili ai documenti archeologici più antichi. A queste si aggiungono carriole ad una ruota e carrelli montati su rotaie di legno. La struttura materiale delle carriole mostrate nei vari trattati o nelle illustrazioni è singolarmente concordante. Esse risultano sia nell'icono-

³⁶ Braunstein 1986, p. 18.

³⁷ Ivi, p. 61. Spesso si riscontrano attrezzi con caratteristiche consone alla consistenza della roccia incassante.

³⁸ Biringuccio 1540, p. 125.

³⁹ Braunstein 1986, p. 21.

grafia dei Vosgi (Graduel di Saint Dié, *Cosmographie*, disegni di Enrich Gross, ecc.)⁴⁰, sia in quella dei trattati di Biringuccio e Agricola, riferibili il primo all'ambiente italiano e il secondo a quello tedesco.

Tra le illustrazioni della *Pirotechnia* si trova anche una portantina a braccia⁴¹, impiegabile nei casi di gallerie molto scoscese.

Dallo studio dei documenti medievali, Bertrand Gille ricava dati importanti sulla struttura materiale delle miniere. I pozzi verticali o sub-verticali, secondo i regolamenti



Pompa a stantuffi azionata da una ruota idraulica dal De Re Metallica.

serbi dovevano essere di 1,42 x 0,82 m, mentre le evidenze materiali di Massa Marittima in Italia riportano a dimensioni di 1 x 1,2 m⁴². Questi solitamente erano ricoperti da una struttura in legno che serviva da chiusura dell'ingresso e protezione contro le intemperie. Le profondità riscontrate a Massa sono comprese tra 50 e 100 m, mentre in Serbia a Novo Brdo nel 1488 le profondità erano comprese tra 85 e 171 m. Talora i pozzi prevedono opere di sostegno in legno o più raramente in muratura, come si riscontra ancora a Massa⁴³.

Le testimonianze materiali di attività estrattive medievali sono numerose. Uno dei casi più suggestivi si trova presso Rocca San Silvestro nei pressi di Massa Marittima (Toscana)⁴⁴, alla sommità della piccola valle del Manienti e riguarda la coltivazione di un deposito di galena argentifera mediante lo scavo di pozzi e cunicoli a seguire la vena, con la creazione di apposite camere là dove il deposito diviene più ricco. Il

scavo risulta estratto dai pozzi mediante cesti o robuste borse di cuoio, con l'ausilio di un verricello montato all'imboccatura del pozzo e generalmente azionato a mano

⁴⁰ Cfr le pagine con le miniature a carattere minerario del Graduel di Saint Dié, le illustrazioni della *Cosmografia* di Sebastien Munstier, oppure i disegni Enrich Gross in Fluck, Bari 1982.

⁴¹ Biringuccio 1540, ultima pagina verso del primo fascicolo non numerato.

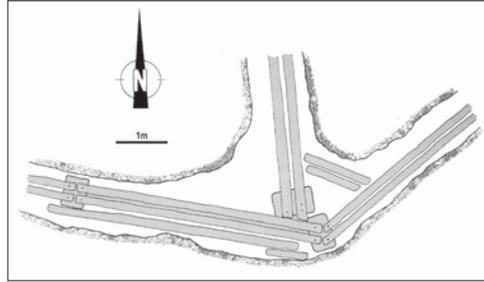
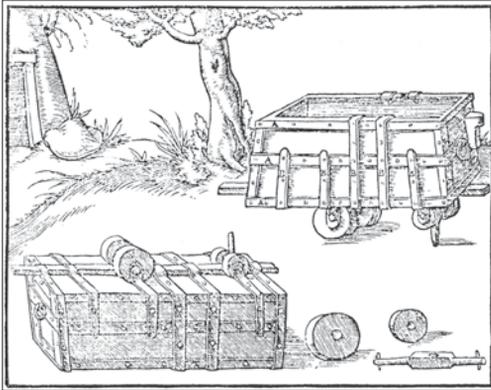
⁴² Gille 1969, p. 288 e Benoit 1988, p. 85.

⁴³ Gille 1969, p. 288.

⁴⁴ Francovich, Parenti 1987, p. 98 e Francovich 1988, p. 39. Il sito è stato oggetto di molte campagne di scavo.

mediante una manovella. All'esterno della miniera le indagini archeologiche hanno consentito di ricostruire le aree di cernita e di frantumazione del minerale.

Evidenze materiali di miniere medievali sono conservate a Monteponi nell'Iglesiente in Sardegna dove si contano oltre 1.000 cavi realizzati in forma di pozzi verticali e sub-verticali, molto irregolari, spesso costruiti seguendo la vena o eventuali fessurazioni naturali, con camere e gallerie di collegamento altrettanto irregolari⁴⁵. Le dimensioni delle imboccature sono solitamente vicine a 1 x 1,5 m, ma le sezioni progressive non



Carrelli minerari e rotaie in legno per lo scorrimento in corrispondenza di un incrocio di gallerie nella miniera di San Luigi a Neuenberg (Haut Rhin - Francia).

seguono alcuna norma. Le profondità in generale non eccedono i 40 - 50 m anche se si conoscono cavi, tagliati obliquamente, che raggiungono i 200 m di profondità⁴⁶.

Un notevole documento è conservato al Museo Nazionale di Budapest dove con pezzi originali recuperati *"in situ"* è stato rimontato un tratto della miniera di XIV - XV secolo di Rudabanya nei Carpazi. Si tratta del fondo di un pozzo con l'attaccatura di una galleria orizzontale; la struttura è interamente rivestita in legno.

Un altro interessante esempio di miniera medievale è quella d'argento di Jaques Coeur a Pampailly (Rhone) in Francia⁴⁷, ove missioni speleologiche hanno consentito di indagare un consistente impianto minerario in cui si sono rinvenute diverse strutture lignee, tra cui elementi di sostegno, passerelle e tratti di rotaie di un sistema di estrazione a carrello. L'impianto di rotaie è realizzato da una coppia di travi a sezione rettangolare montate parallelamente ed è del tutto simile a quelli illustrati dai tecnici cinquecenteschi o da Enrich Gross nelle tavole dei primi del Cinquecento relative alla miniera di Saint Nicolas a La Croix-au-Mines in Lorena⁴⁸ o ancora, a quella mostrata da una delle illustrazioni del Graduel di Saint Dié⁴⁹, riferibile allo stesso ambiente.

Da segnalare anche la miniera di barite di Brandes nell'Oisans (Francia), studiata da una équipe del CNRS francese⁵⁰.

Una serie di eccezionali documenti archeologici sulle miniere d'argento medievali

⁴⁵ Tangheroni 1985, p. 969.

⁴⁶ Ivi, p. 85.

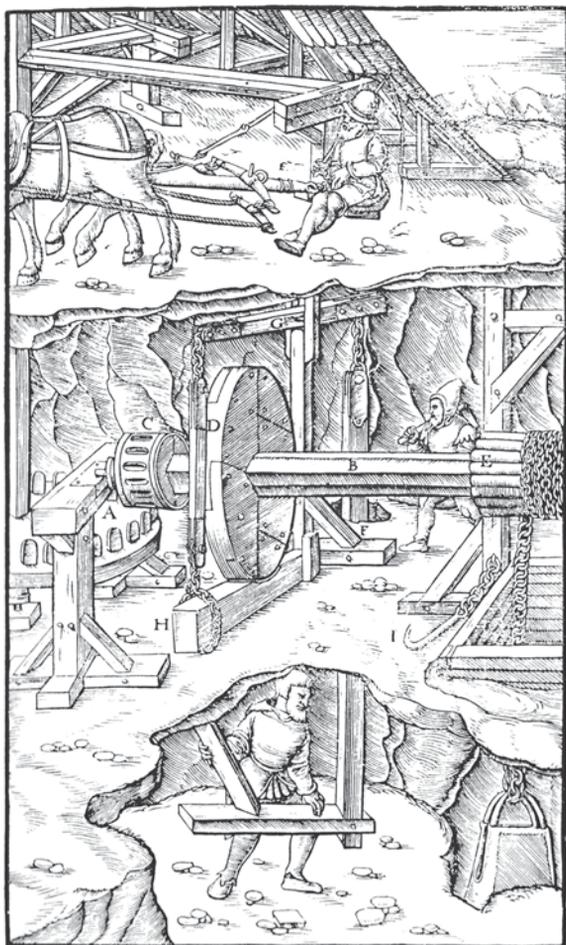
⁴⁷ Braunstein 1986, p. 18.

⁴⁸ Ivi, p.19 e Fluck, Bari 1982, p. 85 .

⁴⁹ Ivi.

⁵⁰ Bailly Maitre 1986, p.26.

e cinquecentesche si trova nei Vosgi a Sainte Croix-au-Mines dove un gruppo di studio durante molti anni di lavoro li ha censiti e studiati in maniera sistematica. In molte decine di chilometri di gallerie e pozzi tagliati nella roccia sono conservate moltissime infrastrutture lignee per il sostegno, l'evacuazione del minerale, il pompaggio dell'acqua e la circolazione dei minatori. La dimensione delle gallerie e l'impianto complessivo delle coltivazioni è molto diverso da quello che si può registrare nelle miniere medievali della Sardegna o dell'Italia Centrale. In questo caso si tratta di un impianto progettato



Complicato verricello per il sollevamento del minerale cavato azionata da una ruota idraulica.

ed eseguito con misurazioni accurate. Le sezioni delle gallerie sono sub-rettangolari allungate, adatte alla frequentazione di un uomo in posizione eretta, con misure approssimative di 1,8 - 2,0 x 0,5 - 0,6 m⁵¹.

Relativamente alle gallerie di miniera Bertrand Gille distingue quattro tipi differenti: di passaggio e trasporto, di aerazione, d'evacuazione dell'acqua e di coltivazione. Le dimensioni previste dai regolamenti serbi sono di 1,07 x 2,13 m, mentre delle evidenze in Bosnia riportano a dimensioni molto ridotte di 0,5 x 1 m. A Massa Marittima le gallerie di passaggio sono di 1,6 - 1,7 x 1,8 m. Le gallerie di sfruttamento sono talora molto irregolari poiché si tratta di cavità che seguono la morfologia del giacimento⁵².

Lo scavo di pozzi e gallerie, particolarmente quelle di scarico dell'acqua, prevede una grande padronanza degli strumenti di misura per il livellamento. Un'immagine di queste tecniche di tracciamento, oltre che

nel trattato dell'Agricola è fornito da un disegno di Francesco di Giorgio Martini ascrivibile al lustro 1470 - 75, che mostra l'utilizzo dello squadro in occasione dello scavo di una galleria per la presa di una rocca assediata⁵³. Il tema viene ripreso dal Della Fratta Montalbano nella seconda metà del Seicento, il quale propone anche numerose

⁵¹ Benoit 1988, p. 106.

⁵² Gille 1969, p. 290.

⁵³ Gille 1972, p. 23.

immagini relative alle misurazioni e al tracciamento, insieme con l'accurata descrizione degli strumenti di misura normalmente impiegati in una miniera del XVII secolo, dedicando un intero capitolo "*Del modo di far li scolatoi, e misurare le cave, e pozzi*"⁵⁴.

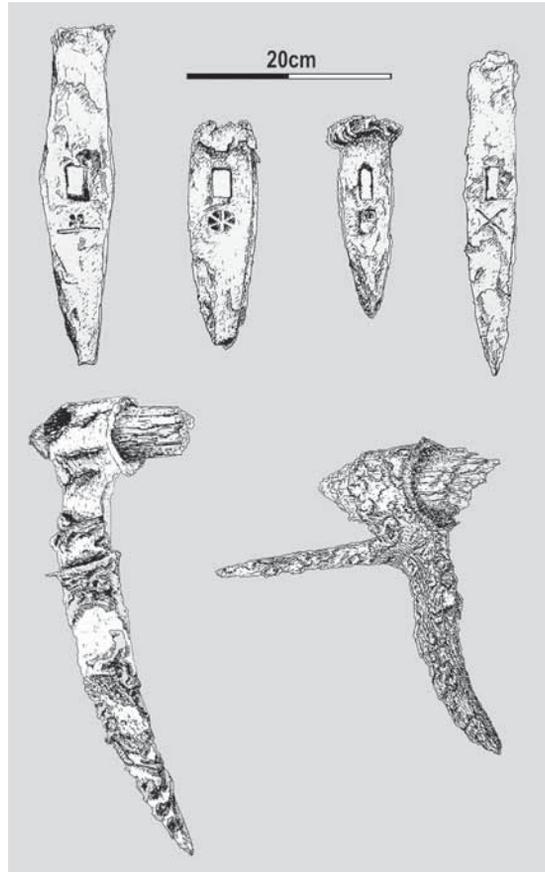
L'abbondante iconografia disponibile, in particolare per il XVI secolo, propone anche la pratica sistematica della raddomanzia nella ricerca dei giacimenti⁵⁵. Sistema questo ancora considerato durante il secolo successivo; tant'è che il Della Fratta ne parla con dovizia di dettagli⁵⁶.

Evidenze materiali dello strumentario dei minatori sono piuttosto abbondanti, come per le epoche precedenti. A questo proposito è da segnalare un documento del 1293 di Massa Marittima nell'Italia Centrale, relativo a una miniera (fossa) detta "Le Meloni", ove su 93 utensili si trovano 40 picconi di varia foggia⁵⁷.

Alcuni reperti analoghi a quelli sardi sono conservati anche nel piccolo Antiquarium di Sainte-Marie-aux-Mines nei Vosgi⁵⁸, al Musée du Fer a Jarville (Nancy - Francia) e in numerosi altri musei europei.

Dalle antiche miniere dell'Iglesiente in Sardegna provengono numerosi martelli, scalpelli e lampade a olio in ferro. Nel piccolo museo di Iglesias sono conservati diversi elementi in legno di una piccola pompa a bozzoli incatenati sul tipo di quella mostrata dall'Agricola nel libro VI. I singoli elementi, a forma di calotta, hanno sezione ellissoidale con diametri all'incirca di 5,5 x 4 cm. Dalla miniera di Pampally in Francia proviene il cilindro di una pompa a stantuffo⁵⁹.

Ancora dalle miniere dell'Iglesiente proviene un secchio globulare in rame conservato nel piccolo museo di Iglesias, probabilmente impiegato come elemento di una



Diversi attrezzi da minatore rinvenuti nei cavi di XV-XVI secolo delle miniere di Neuenberg nel Haut Rhin - Francia. (Da AnceI, Fluck 1988).

⁵⁴ Della Fratta Montalbano 1678, p. 23.

⁵⁵ Fluck, Bari 1982, p. 9.

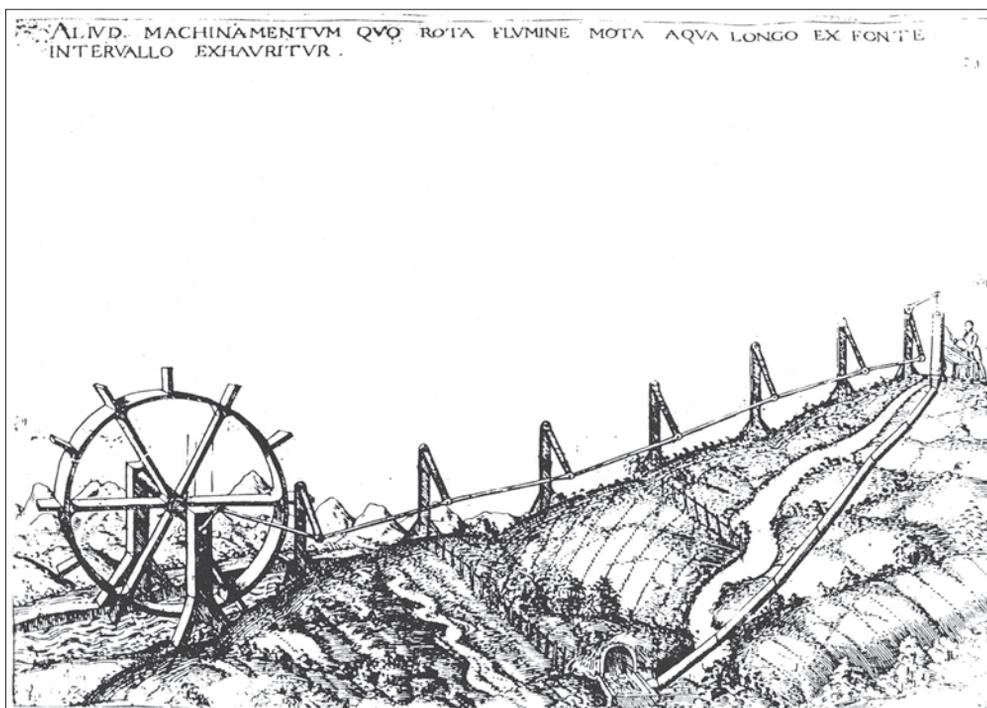
⁵⁶ Della Fratta Montalbano 1678, p. 4.

⁵⁷ Costano per lo più di lampade, martelli e scalpelli, vale a dire le attrezzature che ogni minatore portava con sé.

⁵⁸ Sono stati rinvenuti numerosi manufatti sei-settecenteschi.

⁵⁹ Benoit, Grandemagne 1986, p. 207.

pompa a secchi sul tipo di quelle illustrate dall'Agricola. Nelle miniere cinquecentesche sono molto diffuse anche le pompe a stantuffo azionate da ruote idrauliche collocate in superficie o da più semplici sistemi manuali ma Giorgio Agricola nelle tavole del De Re Metallica illustra anche complessi sistemi a trazione animale che non sembrano di facile applicazione nei contesti minerari solitamente realizzati entro scoscesi ambienti delle montagne, talora difficili da raggiungere anche da abili camminatori sui sentieri dei ripidi versanti vallivi.



Errad - 1584. Pompa a stantuffo azionata da una ruota idraulica collocata a distanza dall'imbocco della miniera con il movimento trasferito mediante un sistema di tiranti interconnessi, sostenuti da bilancieri fulcrati a supporti fissi. Il moto rotatorio è trasformato in moto alternativo mediante il sistema biella - manovella.

6.4 L'età Moderna

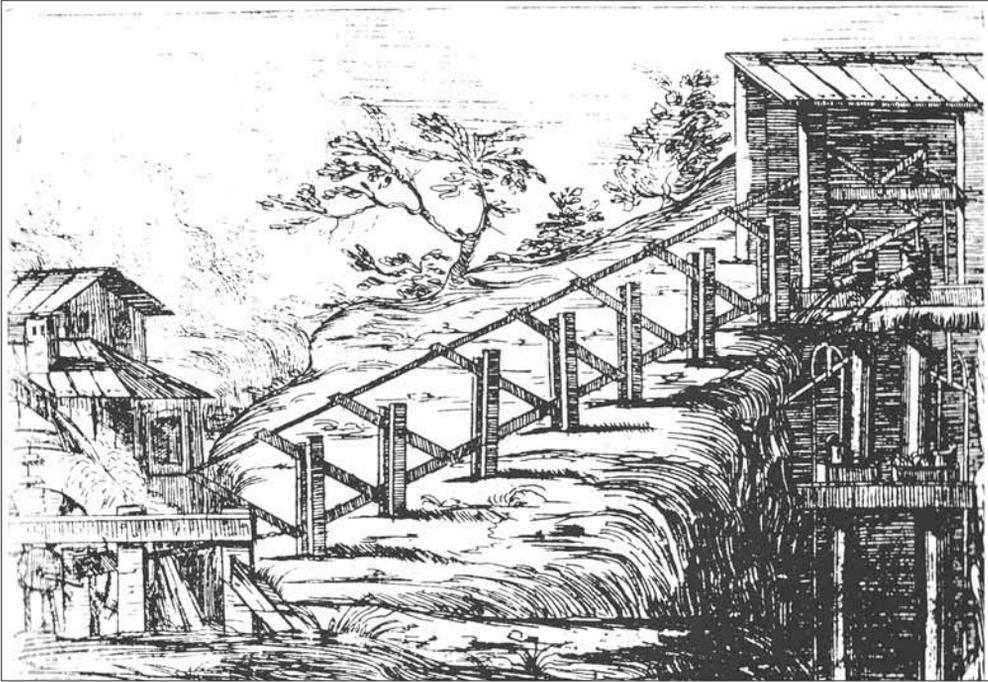
I metodi di cava dei minerali proposti dall'Agricola riguardano indubbiamente quanto di più evoluto si può riscontrare nel XVI secolo in Europa, e in particolare nei numerosi distretti minerari tedeschi, che sin dal Medioevo hanno rappresentato una realtà tecnica particolarmente evoluta. Di conseguenza, l'immagine delle miniere che fornisce è forse più facilmente riscontrabile nel XVII secolo che alla fine del Medioevo. Infatti l'opera dell'Agricola è un trattato moderno destinato a far scuola, che soltanto in parte analizza la situazione in atto, ma per larga misura diviene propositivo di nuove tecniche presenti in pochi poli molto evoluti o addirittura una trattazione teorica.

La prova della validità delle tecniche di cava proposte dall'autore cinquecentesco è riscontrabile nel trattato del Della Fratta che, pure scrivendo oltre un secolo più tardi,

riprende buona parte delle soluzioni tecniche proposte nel *De Re Metallica*⁶⁰.

La struttura delle miniere moderne per larga misura non differisce dalle corrispondenti strutture medievali se non per la maggiore profondità che erano in grado di raggiungere e per i sistemi di ventilazione e di pompaggio di cui via via i distretti vengono dotati.

Giorgio Agricola dedica un lungo capitolo alle macchine da miniera, ripreso e migliorato il secolo successivo dal Della Fratta Montalbano. Questi propone una serie di



Della Fratta Montalbano - 1678. Pompa a stantuffo azionata da una ruota idraulica collocata a distanza con trasmissione del movimento mediante un sistema di doppi tiranti interconnessi e sostenuti da bilancieri fulcrati su solidi montanti.

congegni tra cui le soffierie per alimentare di aria le gallerie, gli argani per il sollevamento del minerale nei pozzi e le pompe per l'estrazione dell'acqua⁶¹. Nelle numerose illustrazioni del *De Re Metallica* e della *Pratica Minerale* si trovano i sistemi di azionamento più disparati che vanno dal più semplice quale l'asse nella ruota o la manovella dei verricelli, fino all'azionamento animale, alle ruote calcatorie o alle ruote ad acqua per l'azionamento delle pompe di drenaggio.

Errard, nel 1584⁶², mostra un interessante sistema di trasferimento del moto alternativo mediante un ordine di tiranti applicato ad una pompa a stantuffo di una miniera. L'applicazione consente di trasferire l'energia prodotta con una ruota collocata all'esterno della miniera, in posizione opportuna per lo sfruttamento di un salto d'acqua. Il

⁶⁰ Della Fratta Montalbano 1678, p. 50.

⁶¹ Agricola 1563, p. 120.

⁶² Jean Errard, (1554-1610): *Le premier livre des instruments mathematiques mechaniques*. Nancy 1584.

6. L'estrazione dei minerali

moto alternativo è ottenuto mediante un complicato sistema biella - manovella.

Il Della Fratta⁶³ alla fine del XVII secolo mostra un sistema di trasferimento del moto di una ruota idraulica per un'analogia applicazione. Il sistema è più evoluto di quello mostrato dall'Errard in quanto prevede due ordini di tiranti distanziati da aste oscillanti fulcrate su un supporto fisso. I vantaggi di questo sistema rispetto a quello cinquecentesco riguardano la trasmissione del movimento con maggiore regolarità.

Il trasferimento del moto alternativo prodotto con un sistema biella - manovella di-



Il suggestivo laghetto delle Conche all'Isola d'Elba che assume un colore sanguigno a causa delle acque che lo alimentano, provenienti da un consistente giacimento di ematite i cui rilasci ossidati tingono l'invaso.

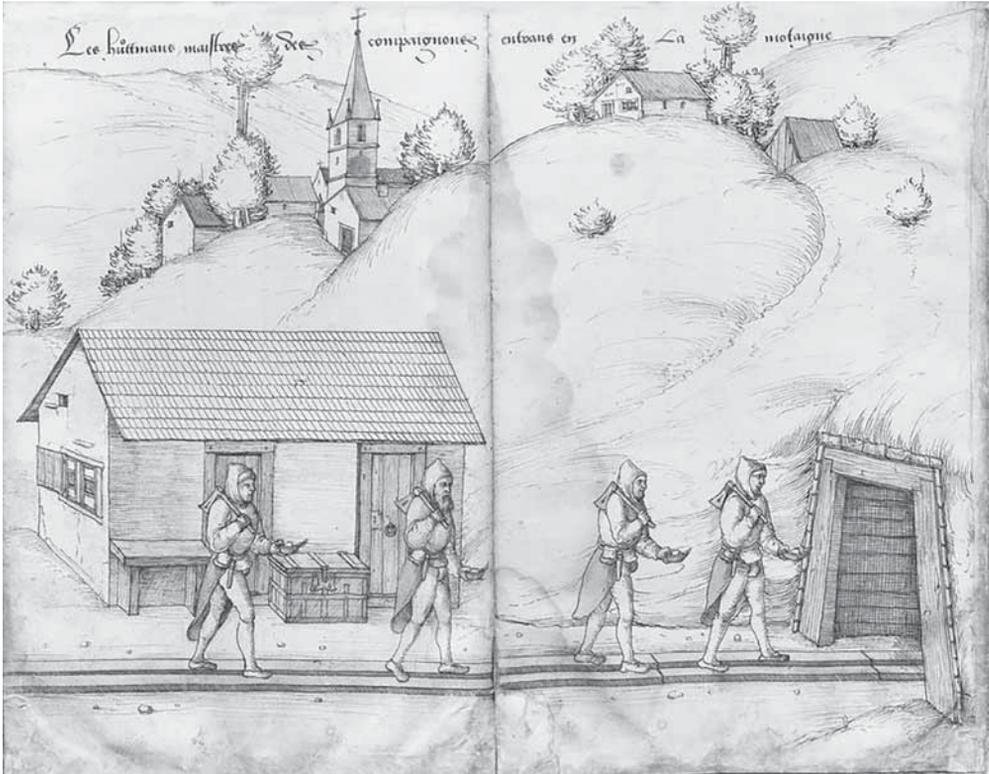
viene un problema di grande rilievo nelle miniere moderne soprattutto per le grandi dimensioni delle gallerie e dei pozzi e conseguentemente per i volumi di acqua da pompare. In molte miniere si conoscono trasferimenti del movimento mediante sistemi a tiranti, lunghi molte centinaia di metri che permettono di trasferire il movimento dalla ruota posta a una certa distanza dall'imbocco, lungo le gallerie, con diramazioni nei pozzi ottenute mediante compassi oscillanti. Questo sistema, di notevole complessità, risulta ulteriormente sofisticato nei secoli XVIII e XIX, grazie all'impianto di ruote aggiuntive azionate da animali da soma direttamente in galleria, le quali consentono di risparmiare lunghi trasferimenti del moto e ottimizzano il sistema di estrazione delle acque. Esempi di simili impianti, talora ancora parzialmente conservati, sono numerosi nell'Europa Centrale. Tra tutti si segnala quello della miniera di Grand-Fontaine nei Vosgi⁶⁴.

⁶³ Della Fratta Montalbano 1678, p. 48.

⁶⁴ Fluck, Bari 1982, p. 64.

Tra le pompe descritte dai tecnici cinquecenteschi si riscontrano prevalentemente delle batterie di stantuffi o ruote a vasi pescanti, oltre alla coclea: una struttura che non risulta in uso il secolo precedente⁶⁵.

Giorgio Agricola mostra anche delle macchine soffianti per l'aerazione delle miniere, e oltre a queste vanno segnalati i ventilatori manuali e le captazioni o i convogliatori orientabili secondo la direzione del vento che funzionano semplicemente sfruttando la pressione dell'aria esterna.



L'ingresso dei carpentieri muniti di lampade nella miniera di argento di Saint Nicholas a La Croix-au-Mines Nei Vosgi (Francia) fogli 12v e 13r del libro di disegni di Enrich Gross (prima metà XVI secolo).

Sulla strutturazione fisica delle miniere l'Agricola offre una trattazione completa che propone un sistema evoluto. Egli dedica a questo tema l'intero "libro V"⁶⁶, ove evidenzia metodi di coltivazione articolati su piani differenziati. Prevalentemente si tratta di gallerie orizzontali comunicanti tra loro e con l'esterno mediante dei pozzi verticali che servono normalmente per aerarle e talora per l'estrazione del minerale grazie all'uso dei verricelli. Lo stesso autore si addentra nei particolari della costruzione proponendo importanti suggerimenti per l'impianto dei sistemi di sostegno delle gallerie mediante palificate connesse da robuste travature⁶⁷.

⁶⁵ Agricola 1563, p. 81.

⁶⁶ Ivi p. 120.

⁶⁷ Braunstein 1986, p. 19.

L'immagine di miniere eccessivamente tecnicistiche che l'autore fornisce riguarda pochi distretti produttivi gestiti da imprenditori illuminati come il francese Jaques Coeur che agisce nel Delfinato, la Repubblica Veneta che possiede le miniere di Agordo nelle Alpi Carniche⁶⁸ o da importanti consorzierie.

Nella maggior parte dei casi la coltivazione era demandata alle comunità che procedevano spesso per iniziativa di singoli particolari o di piccole compagnie. Queste ottenevano facilmente le concessioni⁶⁹ e attuavano la coltivazione scavando stretti cunicoli secondo il filo del giacimento, senza preoccuparsi troppo delle opere di sostegno delle gallerie, o della loro impostazione razionale rispetto ai piani di perforazione. Situazioni critiche, anche dal punto di vista storico, per via dello scavo irrazionale dei depositi, sono segnalate in tutta Europa.

Per quanto attiene alle tecniche di scavo, per tutto il secolo XVI paiono ancora in atto i sistemi medievali, mentre la polvere da sparo, pure nota da molto tempo non risulta impiegata nello scavo delle gallerie di miniera fino al secolo XVII.

Una delle prime notizie di utilizzo della polvere nera, riguarda le miniere di Rame di Agordo nello Stato Veneto e si riferisce al decennio 1640 - '50⁷⁰.

Un notevole esempio di miniera moderna è rappresentato dal filone detto di Saint Louis a Neuenberg nell'Alto Reno, il cui sfruttamento è stato avviato poco dopo la seconda metà del XVI secolo⁷¹. Il complesso, sviluppato su una serie di gallerie e di pozzi per una lunghezza stimata di circa 300 Km, è stato studiato con un'azione sistematica che ha consentito osservazioni archeologiche di notevole importanza⁷². I risultati hanno chiarito le tecniche di escavazione, l'organizzazione della coltivazione e i sistemi di estrazione dei minerali. Da segnalare le rotaie per il rullaggio dei carrelli e i verricelli⁷³. Dai rilevamenti deriva anche un repertorio molto importante di strumenti da lavoro⁷⁴. Nel complesso risultano 28 punteruoli, che recano un manico in legno ora scomparso, con lunghezze che vanno da 84 a 203 mm, quasi sempre contrassegnati con punzonatura eseguita a caldo. A questi si aggiungono una mazza mal conservata, un piccone con tracce del manico e un secondo piccone munito di una punta in asse con il manico dall'impiego poco chiaro (v. fig. a p. 101).

⁶⁸ Gli esempi sono numerosi, sia nell'ambiente italiano, sia in quello transalpino.

⁶⁹ Vergani 1972, p. 620.

⁷⁰ Vergani 1981, p. 69.

⁷¹ Ancel, Flunck 1988, p. 7.

⁷² Ivi.

⁷³ Ivi, p. 80.

⁷⁴ Ivi, p. 91.

7. LA PREPARAZIONE DEL MINERALE

La preparazione del minerale per la riduzione in metallo avviene mediante quattro fasi essenziali che seguono l'estrazione: la selezione, la frantumazione, l'arrostimento e il lavaggio in acqua. Queste operazioni, condotte in tempi differenti, hanno lo scopo di eliminare il più possibile le impurità contenute nel cavato.

Pure con la profonda trasformazione tecnologica delle strutture materiali impiegate nel processo, i metodi per la preparazione del minerale non sono sostanzialmente mutati. Sia l'antico sistema di produzione del ferro al basso fuoco, sia il più moderno con l'impiego dell'altoforno richiedono in linea di massima le stesse lavorazioni per l'approntamento del minerale; al termine delle quali può essere sottoposto alla riduzione. Questa fase è molto importante poiché l'accuratezza nella preparazione incide direttamente sulla qualità del metallo che si ottiene al termine del procedimento.

7.1 Frantumazione e selezione

La cernita del minerale rientra nel complesso di operazioni svolte nell'ambito della miniera con lo scopo di eliminare i resti della roccia incassante che per qualche motivo ancora dovesse accompagnare il minerale.

La maggior parte di queste operazioni, che si svolgono a mano, sono prerogativa di donne e bambini, i quali talora vengono impiegati anche nel faticosissimo compito di trasportare il cavato all'esterno della miniera attraverso i lunghi cunicoli delle gallerie.

La lavorazione, di per sé banale, consiste nel separare il minerale dalla roccia mediante l'uso di una martellina appuntita, ma forse in antico con attrezzi più rudimentali o più semplicemente con strumenti in pietra dura, di cui si ha traccia nelle coltivazioni preistoriche (v. fig. a p. 85).

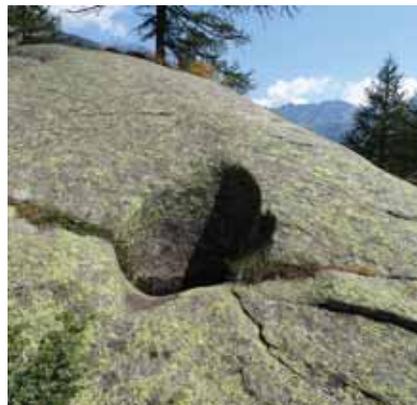
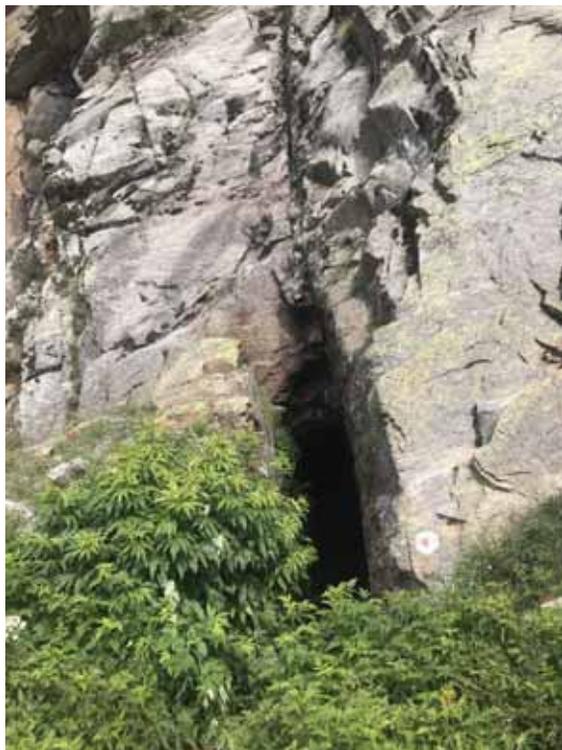
Le aree di lavoro, solitamente collocate vicino all'ingresso delle miniere, sono i grandi spiazzanti antistanti l'imbocco, che crescono di pari passo con l'escavazione dove vengono scaricati i detriti di roccia incassante. In queste piazzole viene accumulato il minerale cavato e quello depurato mediante cernita.

Lo stazionamento del cavato ai margini della miniera non è breve. L'esposizione alle intemperie e particolarmente alla gelivazione, che agendo sulle interfacce tra minerale e roccia ne favorisce il distacco, rappresenta un'operazione preliminare alla cernita manuale offerta direttamente dagli eventi naturali, evitando lunghe lavorazioni manuali. Questa pratica è piuttosto ben documentata nei diversi manuali di metallurgia del XVI e XVII secolo.

Il minerale così approntato viene trasferito alla fonderia. L'operazione spesso vede impegnati gli stessi minatori che trasportano a spalla il cavato. Nelle coltivazioni più importanti vengono impiegati animali da soma o da traino in carovana.

Analisi dei documenti

Un caso archeologico emblematico è rappresentato dal sito minerario dell'Allietta a Ceresole Reale (Piemonte), dove si sono rilevati indizi archeologici della frequentazione a scopo estrattivo da parte di metallurgisti della tarda età del Ferro, sia su vene superficiali, sia entro cavi di miniera¹, ha consentito di individuare un grande atelier con diverse fosse di frantumazione e lavaggio. Si tratta di profonde buche scavate nel substrato roccioso degli affioramenti di gneiss a 1728 m s.l.m, profonde oltre 70 cm



*Miniera dell'Allietta - Ceresole Reale (Torino).
(Sopra), conca di frantumazione e macerazione
dell'ematite, e dettaglio della vena.*

con 75 - 80 cm di diametro, levigate dall'uso e arrossate dall'inclusione di ossidi nelle porosità della pietra a denunciare lunghe fasi d'uso. Data l'altitudine queste coltivazioni sono da intendere stagionali. Nelle conche il minerale viene frantumato mediante pestelli azionati manualmente, ma funzionano anche quali catini per il lavaggio e la macerazione del frantumato al fine di espellere la parte più leggera delle impurità, evacuata attraverso le canalette di scolo, facendo permanere il minerale nelle fosse per diversi mesi (forse durante la stagione invernale), affinché l'azione delle intemperie e la gelivazione elimini un'ulteriore frazione d'impurità. Al termine, il cavato adeguatamente depurato viene prelevato e arrostito entro piccole fornaci aperte simili alle calcare con lo scopo di eliminare le impurità più consistenti, come le tracce di zolfo e i solfuri (pirite).

Immagini visive delle operazioni di frantumazione e selezione sono fornite dalle illustrazioni di Enrich Gross relative alla miniera d'argento di La Croix-aux-Mines nei

¹ Cima 2023, p. 186. La galleria di miniera risulta già abbandonata da lungo tempo negli anni Ottanta del XVIII secolo, cfr Galleani Napione, 1785, p. 369.

Vosgi dalla miniatura del Graduel de Saint Dié², ove è ben visibile la martellina impiegata, del tutto simile a quella usata per i lavori di estrazione in miniera. Anche l'Agricola³ propone numerose illustrazioni che mostrano operai o operaie addette alla cernita e alla frantumazione del minerale.

Il trasporto del minerale selezionato, se effettuato a spalla, avviene mediante le stesse sacche o gerle impiegate per l'estrazione dalla miniera.

7.2 Arrostimento

Molto spesso i giacimenti ferrosi contengono una quantità non indifferente di minerali secondari sotto forma di impurità che quasi sempre risultano nocive al processo di riduzione. Solitamente con l'ematite e la magnetite si riscontra la presenza in tracce di pirite (solfuro di ferro), particolarmente dannosa al processo di riduzione poiché se surriscaldata produce acido solforico. Per eliminare questi effetti negativi i minerali, prima della riduzione, vengono sottoposti a un processo di arrostitimento entro forni a tino che consentono di eliminare la maggior parte delle impurità alterabili al calore.



Coppia di piccoli basamenti litici per la frantumazione manuale della barite nel villaggio minerario di Brande-en-Oisan (Delfinato - Francia).

Il processo prevede l'impiego di apposite fornaci caricate dall'alto, a strati alterni di legna secca e minerale di ferro, fino a colmare il vano per circa i 3/4.

Il procedimento, che prevede il completo consumo del combustibile, dura molte ore (oltre una giornata) e richiede un governo attento condotto talora aggiungendo combustibile e parzializzando l'apertura basale al fine di evitare l'eccessivo surriscaldamento o lo spegnimento del fuoco⁴. Al termine dell'operazione, il minerale arrostito rimane accatastato al fondo del forno e di qui viene estratto attraverso l'apertura basale, in capo a qualche giorno, non appena la temperatura scende e il materiale si può agevolmente maneggiare con i badili.

Analisi dei documenti

I trattati cinquecenteschi dell'Agricola e del Biringuccio informano ampiamente sulle fornaci o roste, come le definisce il Della Fratta⁵, mostrando prevalentemente delle strutture aperte entro le quali il minerale viene sottoposto ad arrostitimento su un fuoco di legna.

² Fluck, 1982, p. 85.

³ Agricola 1563, p. 229.

⁴ Cima et al. 1985, p. 542.

⁵ Biringuccio 1540, p. 149, Agricola 1563, p.306 e Della Fratta Nontalbano 1678, p. 58.

7. La preparazione del minerale

Nelle pur diligenti trattazioni non si trovano riferimenti particolari al trattamento dei minerali di ferro che spesso richiedono strutture fisiche più complesse.

Il Da Lezze⁶, pur toccando soltanto marginalmente il problema delle strutture materiali dei mezzi di produzione riferisce che le roste hanno la forma dei forni per la calce: «...si conduce alle fornase nell'istessa maniera a quanto che si cuociono anco le pietre...».

Il Della Fratta⁷, senza descrivere il processo di arrostitimento del ferro, mostra delle

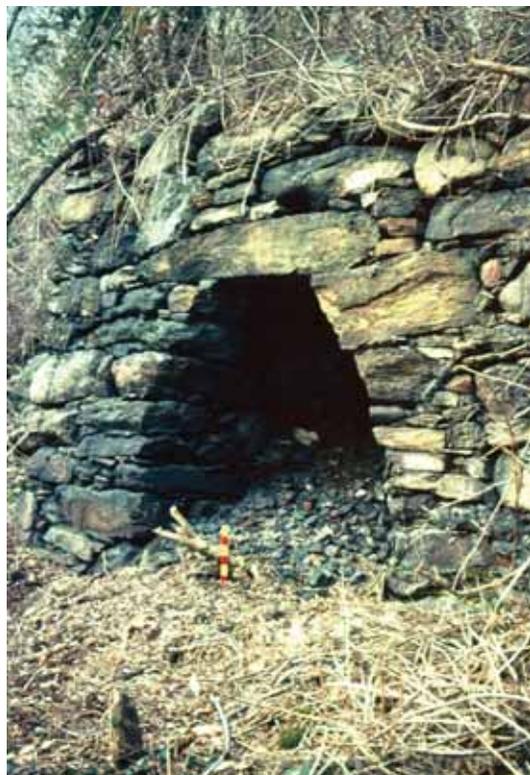


Calcara, secondo Vannoccio Biringuccio affine ai forni di arrostitimento dei minerali di ferro in un'incisione del *De la Pirotechnia*.

(A lato) La bocca di scarico di una fornace di arrostitimento rinvenuta lungo il corso dell'Asa nel comune di Meugliano (Piemonte), che ancora conserva una porzione scartata o persa di minerale arrostito. La struttura si trova a poche centinaia di metri dai cavi di miniera medievali per lo sfruttamento di cospicui giacimenti di ematite e appartiene a un complesso sistema di fornaci che conta oltre 20 elementi.

roste fatte come le calcare che potrebbero essere attribuite al trattamento del minerale di ferro.

Le ricerche archeologiche condotte in Canavese⁸ hanno consentito il rinvenimento di strutture produttive riferibili a diverse epoche. Lo scavo di una delle più antiche, recante la data

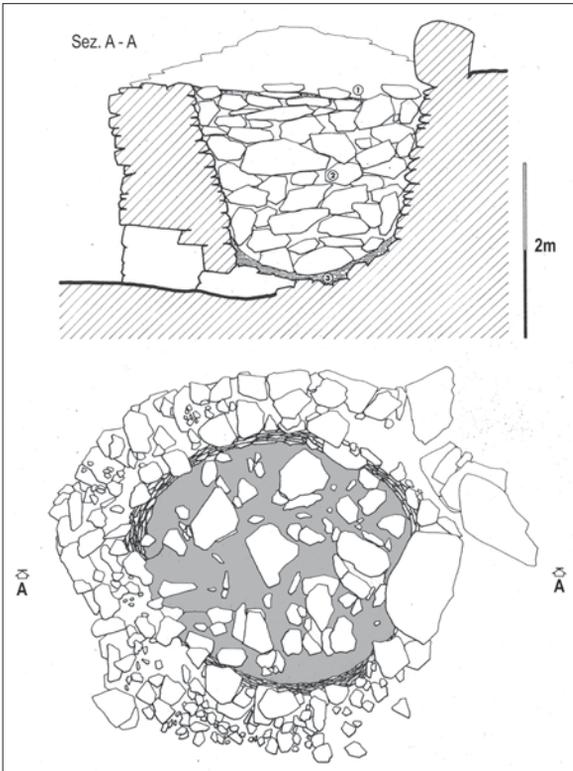


⁶ Da Lezze 1973, p. 598.

⁷ Della Fratta Montalbano 1678, p. 67.

⁸ Cima et al. 1985, p. 544.

incisa 1517, ha consentito di indagare nel dettaglio la struttura materiale. Il manufatto presenta forti analogie con il forno da calce mostrato dal Biringuccio⁹; analogamente al Galleani Napione che nel 1785 descrive il procedimento di riduzione del minerale praticata a Brosso («des fours construits à la manière des fours à chaux»)¹⁰. La struttura consta di un grande ventre a forma di tino rastremato alla base, realizzato entro un terrapieno contenuto da un potente muro di sostruzione sul quale è collocata l'apertura di scarico. La bocca, di forma circolare è libera e consente un'agevole operazione di



Fornace di arrostitimento tardo-medievale scavata a Brosso lungo il corso del torrente Assa dove si trova un complesso sistema minerario con origini protostoriche. 1. Livello di sigillatura; 2. Colmataura per il collasso delle parti alte. 3. Livello di fondo.

(A lato) miniatura dal Graduel di Saint-Dié con frantumazione e il lavaggio del minerale.

carica dall'alto, sfruttando il ripiano offerto dal terrapieno. Le dimensioni approssimative del tino sono di 2 - 2,5 m di diametro e circa 3 m di altezza, in accordo con le osservazioni del De Saint Ange¹¹ che descrive i forni di arrostitimento nel 1835: «...ont la forme d'un cone tronque renversé, dont la hauteur est d'environ 3 m, sur 1,4 m à 1,6 m de diamètre a la base inferieure, 1,9 à 2,1 m à l'orifice superieur». Alla base è collocata

⁹ Biringuccio 1540, p. 149.

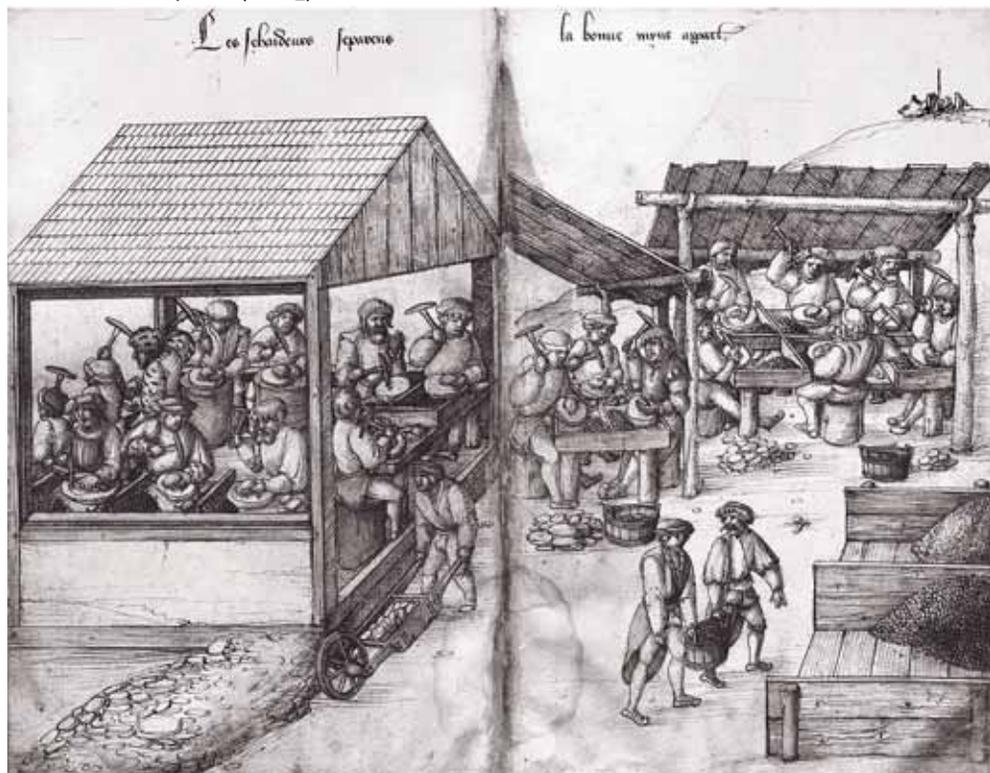
¹⁰ Galleani Napione 1785, p. 348.

¹¹ De Saint Ange 1835, p. 74.

7. La preparazione del minerale

l'apertura di scarico di forma quadrangolare di pochi decimetri di lato, che comunica con un piccolo portale di circa 1,5 x 1 m. Attraverso quest'ultimo si manovra in fase di scarico del minerale arrostito.

Le strutture indagate direttamente, come quelle illustrate nei testi tecnici sono in pietra connessa a secco. L'uso normalmente rende la parte interna molto corrosa per via degli acidi che si formano durante il procedimento e in primis l'acido solforico derivante dalla tracce di pirite (FeS_2).



Cernita e prima frantumazione manuale del minerale nell'impianto minerario di La Croix-au-Mines nei Vosgi dai disegni di Enrich Gross - 1530 circa, (foglio 15v - 16r).

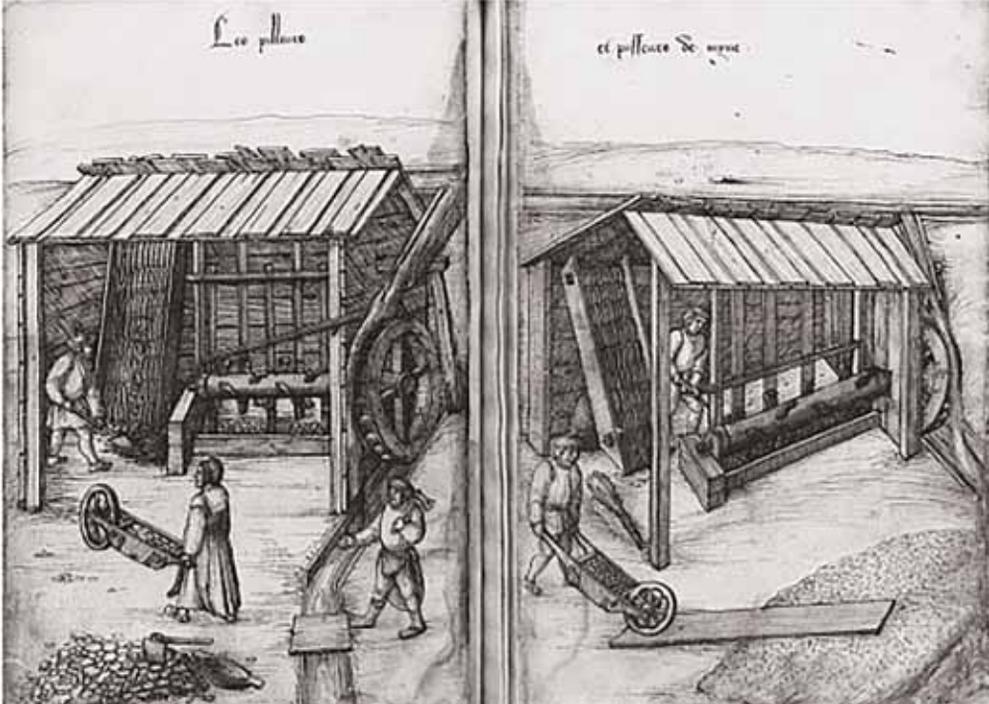
7.3 Sminuzzatura

Il minerale di ferro, trasferito alla fonderia, solitamente è ancora tagliato secondo una pezzatura piuttosto grande. Qui viene sminuzzato in piccoli pezzi che testi tecnici differenti sono concordi nel definire della dimensione di una noce. Questa operazione in antico era svolta manualmente percuotendo con un mazzuolo o con semplici ciottoli i blocchi di minerale posati su un basamento di pietra. A partire dal basso Medioevo gli insediamenti più evoluti si dotano di pestatoi mossi dall'energia idraulica.

Sia la letteratura tardo-medievale sia i rinvenimenti archeologici riportano a numerose varianti nelle strutture materiali di queste macchine, spesso riccamente illustrate nella vasta iconografia cinquecentesca con i dettagli costruttivi delle singole strutture.

Nel caso di minerali particolarmente teneri talora si procede alla frantumazione mediante mulini a macine litiche del tutto simili a quelle impiegate per la macinazione del grano¹². Escludiamo comunque che simili strutture siano state impiegate nella frantumazione dei minerali di ferro, solitamente piuttosto consistenti.

In qualche caso l'operazione di frantumazione del minerale si accompagna con quella di setacciatura che avviene passando il minerale su una graticola inclinata realizzata da un pannello di vimini intrecciati¹³.



Pestatoio dell'impianto minerario di La Croix-au-Mines nei Vosgi, mostrato da due angolature differenti in una tavola di Enrich Gross - 1530 circa, (foglio 16v - 17r).

Analisi dei documenti

Lo scavo del villaggio minerario legato all'estrazione della barite dell'annessa area produttiva a Brandes en Oisans (Delfinato) ha consentito di recuperare numerosi basamenti litici di forma sommariamente parallelepipedica recanti la faccia superiore incavata e levigata, conseguente al prolungato uso quali supporti per la frantumazione manuale del minerale estratto nelle miniere prossime all'abitato¹⁴.

Un unico documento medievale tedesco riporta la notizia di un pestatoio (follone meccanizzato) impiegato in metallurgia. Si tratta della menzione, nel 1392, di «*duarum domorum, ubi ferrum per folles demolliri consuevit vulgo Vosuereuhaz appellatarum*»¹⁵.

¹² De Saint Ange 1835, p.74 - p. 250 e Della Fratta Montalbano 1678, p. 61.

¹³ Fluck, 1982, p. 64.

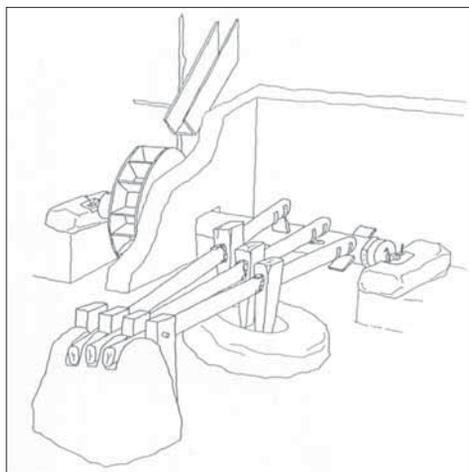
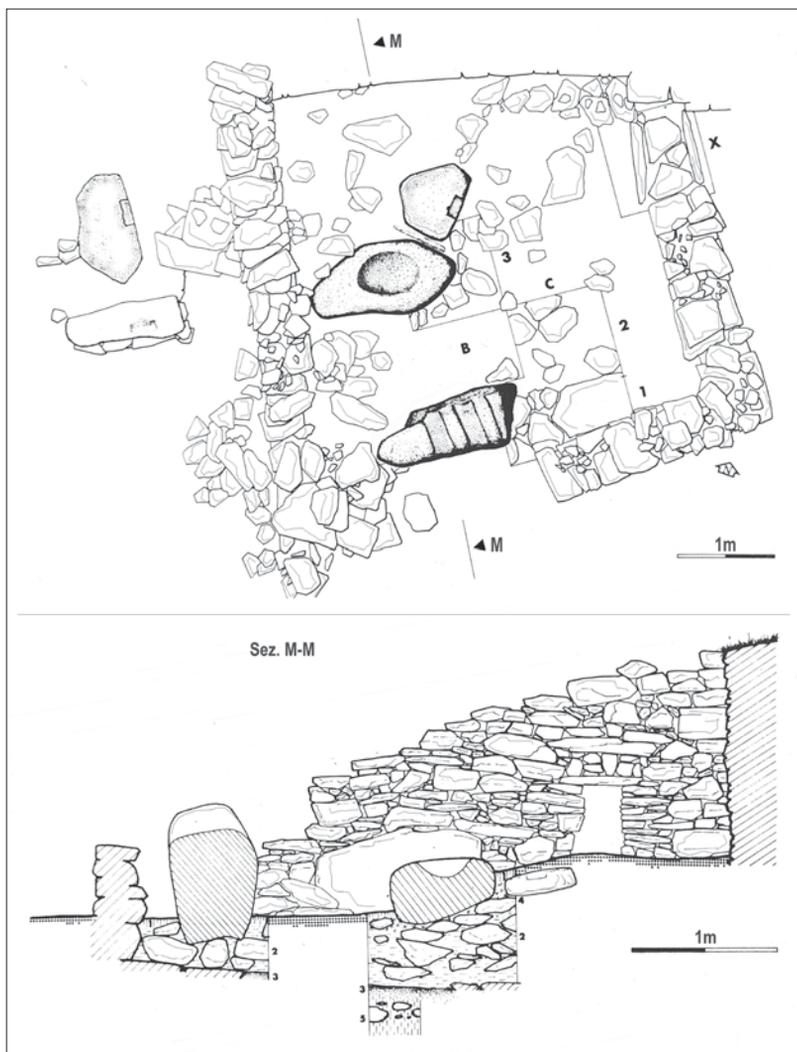
¹⁴ Bailly Maitre 1986, p. .26.

¹⁵ Heckenast 1968, p. 181.

7. La preparazione del minerale

Rilievo dei resti del pestatoio meccanizzato azionato da una ruota idraulica scavato a Brosso in Valchiusella (Piemonte), dove si nota la pesante lastra con gli incavi di guida e fulcro dei battenti e la conca entro la quale agivano i pestelli per la frantumazione del minerale. Accanto a questa vi è la lastra con l'incavo per il supporto dell'albero motore che risulta ruotata e traslata rispetto a quella esterna per la spoliazione dell'edificio. La datazione della struttura è ai secoli XV-XVI.

(Sotto) Il disegno ricostruttivo del meccanismo contenuto nel piccolo edificio costruito in pietra a secco. (Fotografia nella p. a fronte).



I trattati cinquecenteschi dell'Agricola e del Biringuccio, il Graduel del Saint Dié, i disegni di Enrich Gross o quelli della Cosmographie di Sebastien Munstier mostrano strutture di questo tipo azionate da una ruota idraulica che, pur essendo simili, implicano varianti tali da suggerire un'evoluzione della struttura materiale¹⁶. Le diverse illustrazioni propongono come impianto più antico un meccanismo costituito da un'incastellatura rigidamente fissata nel terreno, recante una

¹⁶ Fluck, Bari 1982, p. 15, Agricola 1563, p. 240 e Della Fratta Montalbano 1678 p. 61.

batteria di pestelli paralleli, posti verticalmente e posizionati entro guide orizzontali. In alcuni casi questi agiscono sul suolo, che riteniamo rinforzato da un basamento infossato, mentre in altri è più evidente una struttura di contenimento del minerale a forma di robusto bacino. Durante il funzionamento i pestelli vengono sollevati da un albero a camme azionato da una ruota idraulica del tipo “per di sopra”, alloggiato in posizione retrostante e ricadono a gravità sull’ammasso del minerale da frantumare.

Una buona illustrazione di questo impianto si trova nel Graduel di Saint Dié¹⁷ ed



Il pestatoio di Brosso durante lo scavo v. p. a fronte), sito in un piccolo edificio costruito lungo il corso del torrente Assa dove si trova la maggior parte dei cavi di miniera medievali sui giacimenti di ematite.

(A lato) resti di un altro pestatoio meccanizzato di Brosso sommerso dal colluvium di versante.



è riferibile al periodo 1504 - 1514. Essa riporta un sistema a 6 pistoni, distanziati tra loro e agenti direttamente su un basamento piano interrato. Ciò comporta una certa diseconomia derivante dalla dispersione del materiale trattato.

Nei disegni di Enrich Gross¹⁸, eseguiti intorno al 1530, si nota un grande bacino atto a contenere il minerale da frantumare e pochi anni dopo diverse illustrazioni del De Re Metallica¹⁹ mostrano impianti più compatti che agiscono entro bacini contenenti acqua,

¹⁷ Fluck, Bari 1982, p. 58.

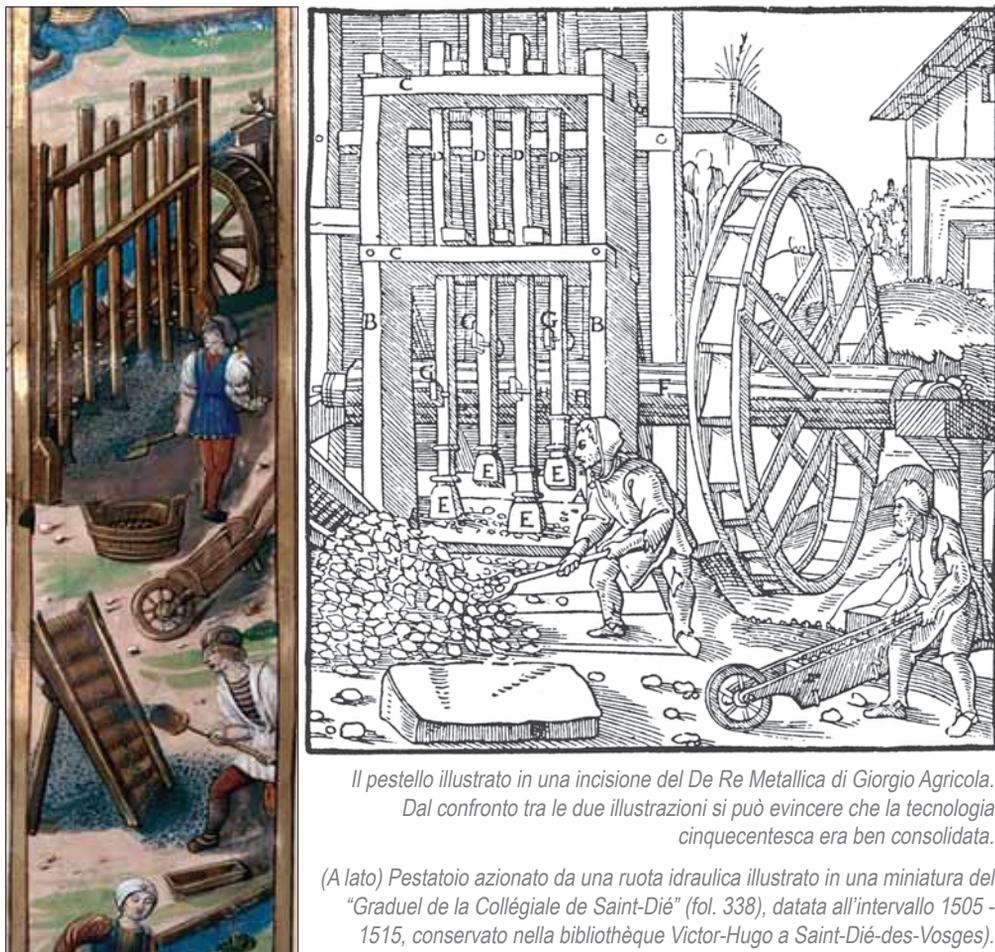
¹⁸ Gross 1530, f. 26.

¹⁹ Agricola 1563, p. 240.

7. La preparazione del minerale

per ulteriore lavaggio del minerale e forse flottazione delle parti più leggere.

Nella Pratica Minerale del 1678 è mostrato un pestatoio a 6 pistoni, molto sofisticato associato a un sistema di trasporto e lavaggio del minerale a più stadi, in grado di effettuare anche la separazione del frantumato, in funzione della granulometria²⁰, oltre a un sistema di setacciatura manuale a crivello. Di notevole interesse l'estimo del 1623 di un'affineria a Bon Port nel Giura Francese che riporta un maglietto con il battente in ferro per il pestaggio del minerale: «*magletum... pro pestabitur venam*»²¹.



Il pestello illustrato in una incisione del *De Re Metallica* di Giorgio Agricola.
Dal confronto tra le due illustrazioni si può evincere che la tecnologia cinquecentesca era ben consolidata.

(A lato) Pestatoio azionato da una ruota idraulica illustrato in una miniatura del "Graduel de la Collégiale de Saint-Dié" (fol. 338), datata all'intervallo 1505 - 1515, conservato nella bibliothèque Victor-Hugo a Saint-Dié-des-Vosges).

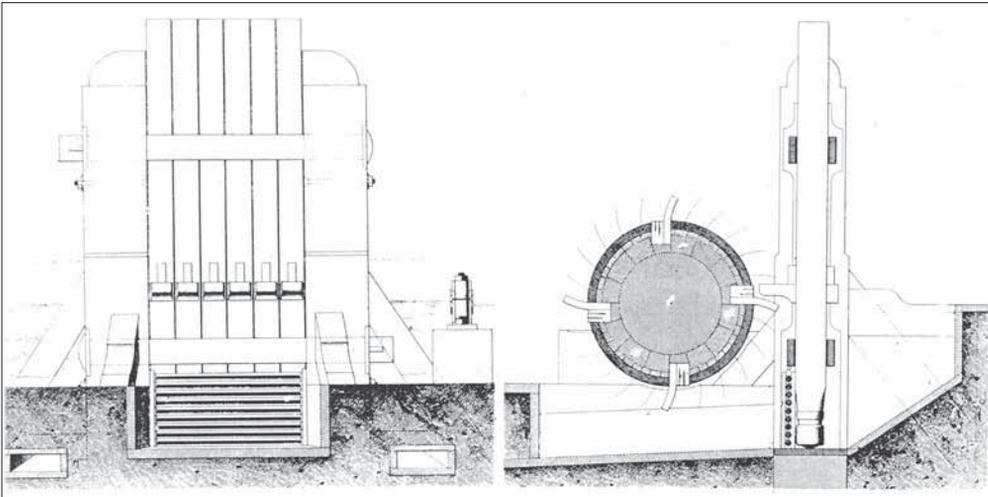
Le ricerche condotte dallo scrivente in Valchiusella (Piemonte), nell'ambito delle attività di ricerca del Museo Archeologico del Canavese relativamente al complesso produttivo canavesano di Brosso hanno condotto i ricercatori a censire i siti relativi a quattro contesti contenenti i resti di pestelli meccanizzati. Lo scavo stratigrafico di quello più completo²² ha consentito la ricostruzione dettagliata della struttura materiale. Questa macchina ha un impianto differente da quelli mostrati dai tecnici cinquecenteschi. Pur

²⁰ Della Fratta Montalbano 1678 p. 61.

²¹ Pelet 1971, p. 12.

²² Cima 1984, p. 542.

funzionando anch'esso mediante un albero a camme mosso dall'energia idraulica, il meccanismo studiato aveva tre pestelli oscillanti, fulcrati su un pesante basamento litico che costituiva la parte rigida della struttura. Le mazze battenti agivano su un bacino di pietra all'interno del quale era posto il minerale da frantumare. Le dimensioni rilevate rimandano ad aste dei pestelli lunghe circa 3,5 m, mentre l'albero motore superava di poco i 3 m. La struttura del pestatoio era costruita all'interno di un complesso produttivo più articolato, come mostra il disegno allegato alla domanda per un nuovo impianto in

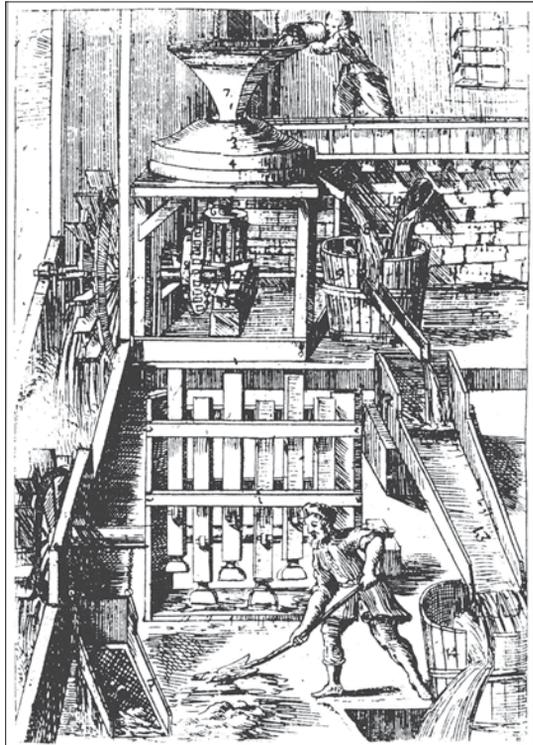


Disegno della struttura di pestello meccanizzato illustrato nel trattato di W. De Saint Ange della prima metà dell'Ottocento riferibile all'impianto di altoforno di Jean d'Heure (Meuse - Francia).

(A lato) L'impianto di macinatura e il pestello illustrato nel trattato del Della Fratta del 1678.

Valle d'Aosta del 1812, dove con buon dettaglio si vede un pestatoio a pestelli oscillanti contenuto in una sommaria tettoia situata in prossimità di un forno di arrostito²³.

La macchina studiata lungo il corso del torrente Assa è collocata a breve distanza dai cavi di miniera e da diverse batterie di fornaci di arrostito. Nel complesso, la struttura ha una certa affinità con i folloni per il trattamento dei panni di lana. Le mazze battenti in legno rivestite di ferro agivano nella



²³ AST, Sezione "Ferrieri".

7. La preparazione del minerale

conca litica che di tanto in tanto era svuotata del frantumato e ricaricata con altro minerale da frantumare. Il blocco litico con gli incavi di ancoraggio e guida dei pestelli doveva sostenere sforzi di una certa consistenza poiché in una fase d'uso risulta fratturato; fatto che dovette degradare la macchina a due soli elementi battenti. L'azionamento avveniva da tergo, grazie al moto rotatorio di un albero azionato da una ruota idraulica del tipo "per di sopra", munito di solide camme che interferivano con l'estremità libere delle aste vincolate ai pestelli. Lo scavo del piano d'uso del piccolo edificio con sondag-



(Sopra) Dettaglio dell'azionamento a camme della macchina ad asta singola battente, mossa da un albero motore mostrato dopo la spoliazione antica, con lo smontaggio del cuscinetto metallico alloggiato nel basamento sul quale ruotava il perno interno.

(A lato) Resti della canaletta di adduzione dell'acqua realizzata scavando un tronco e i resti della ruota motrice con il pesante mozzo in pietra che costituiva un potente volano per la regolarità di marcia della macchina.

Il sistema funzionò in antico come pestatoio per l'ematite cavata in loco e presente in maniera diffusa all'interno del vano e nel XIX secolo, dopo il decadimento in ambiente rurale, come follone.

gi piuttosto estesi ha consentito di recuperare due frammenti di terre cotte classificabili come ceramica graffita tarda, ascrivibili alla fine del XV o inizio del XVI secolo, e altre meno caratterizzate, inquadrabili nel complesso della cosiddetta "terraglia nera". In base alle caratteristiche costruttive e ai pochi rinvenimenti in scavo si ritiene che questo sistema sia entrato in uso con buona probabilità a partire dalla fine del XV secolo o forse più probabilmente dall'inizio del XVI, restando in attività fino al XVII, quando venne abbandonato per la scarsa capacità produttiva in rapporto alle mutate esigenze di approvvigionamento del ferro dei mercati settecenteschi.

Un secondo pestatoio è stato studiato nel comune di Gauna (Piemonte), lungo il corso del torrente Chiusella, a maggiore distanza dall'ambiente minerario del vallone

dell'Assa ma in posizione più favorevole, sia per l'azionamento idraulico, sia per la vicinanza a numerose fucine e ferriere agenti lungo il medio corso del torrente, dove con una certa facilità si sono ricavati canali di adduzione dell'acqua per l'alimentazione dei motori idraulici. Si tratta dei resti di un sistema strutturalmente simile a quelli illustrati nei trattati cinque-secenteschi, ad aste battenti ma a differenza di questi l'impianto valchiusellese è a unico elemento mobile costituito da un pesante tronco posto verticalmente, guidato da due montanti solidamente ancorati a terra, agente su un bacino



in pietra dove avveniva la frantumazione del minerale. Anche in questo caso il movimento era garantito da un albero a camme azionato da un motore idraulico del tipo "per di sopra", di cui si conserva la canaletta di adduzione dell'acqua, monolitica, ricavata da un tronco svuotato e il pesante mozzo della ruota in pietra che fungeva da volano garantendo il moto regolare della macchina. L'edificio pericolante non ha consentito l'esecuzione di scavi nel suolo di occupazione e di conseguenza non si dispongono elementi per collocare cronologicamente la struttura. In base ai pochi documenti disponibili, nella seconda metà dell'Ottocento questa risulta operante quale folgone per la pesta della canapa dopo la macerazione. Di conseguenza si può presumere che l'impianto sia databile al XVII secolo e che sia rimasto in uso fino al XVIII.

Veduta dall'alto del meccanismo battente del pestatoio di Gauna.

L'evoluzione dei sistemi tecnologici nei secoli XVIII e XIX non introduce modificazioni sostanziali nella struttura materiale di questa macchina. La prova deriva dal rilievo del De Saint Ange²⁴ relativo al pestello meccanizzato dell'impianto di Jeand'heure (Meuse), che mostra un pestatoio a sei pistoni, del tutto simile a quelli cinque-secenteschi. In un altro impianto questi propone una novità rappresentata da un sistema di rimiscelamento automatico del minerale da frantumare, realizzata sfruttando un grande bagno liquido. Costruttivamente la struttura ottocentesca è più raffinata e sicuramente più potente, ma del tutto analoga sul piano tecnologico in tutti gli elementi essenziali.

²⁴ Saint Ange 1835-382, p. 4.

7.4 Lavaggio

Prima di venire sottoposto al processo di riduzione il minerale selezionato, sminuzzato e arrostito viene posto a macerare entro grandi fosse piene d'acqua.

In questo modo viene eliminata una parte delle impurità ancora presenti ed esposte mediante la sminuzzatura e l'arrostitimento.

In qualche caso, soprattutto di metalli preziosi, la macerazione non avviene e il lavaggio è condotto manualmente ponendo il minerale entro panieri o mastelli forati



Disegno con veduta di Arreux (Ardenne), datato 1607.

e trattato per immersioni successive entro un flusso d'acqua corrente.

Nel caso del ferro la macerazione avviene entro grandi bacini artificiali dove il minerale viene lasciato a macerare anche per lunghi periodi di tempo.

Analisi dei documenti

Tra le principali fonti va annoverato ancora l'Agricola che mostra numerosi modi di lavare e separare i minerali²⁵. A questi si aggiungono il coevo Graduel di Saint Dié o le tavole di Gross con belle immagini in cui si vede il lavaggio dei minerali entro un mastello forato che viene immerso ripetutamente in acqua²⁶ (v. p. 111). Malauguratamente nessuno di questi documenti riguarda la metallurgia del ferro. Un documento del 1179, tra i più antichi a nostra disposizione, riguarda Bergamo e riferisce di un canale di forno da ferro, il cui impiego non è specificato, ma sicuramente oltre al probabile azionamento di una batteria di mantici, si può pensare al lavaggio del minerale²⁷.

Un altro documento importante riguarda l'abbazia di Clairvaux dove in documenti del XVI secolo, a proposito del processo produttivo del ferro sono citati i "lavoires" come prima fase di trattamento del minerale²⁸. I documenti materiali relativi al trattamento dei minerali di ferro sono numerosi e riguardano tutti i più importanti contesti europei. A titolo di esempio si cita il fondo "Ferrieri" di età Napoleonica dell'Archivio di Stato di Torino riguardante i distretti del Canavese e della Valle d'Aosta²⁹.

Suggestivo appare il disegno del 1607 relativo alla ferriera di Arreux nelle Ardenne dove accanto alla struttura produttiva è chiaramente indicato un bacino che alimenta le ruote idrauliche e che al contempo crediamo impiegato nella macerazione dei minerali arrostiti.

²⁵ Agricola 1563, p. 74.

²⁶ Fluck, Bari 1982, p. 58.

²⁷ Reynolds 1985, p. 64.

²⁸ Fossier 1961, p. 9.

²⁹ Cima et al. 1985, p. 560.

8. LA RIDUZIONE DEL MINERALE IN METALLO

Uno dei temi centrali nella storia della metallurgia, intorno al quale si sono cimentati non pochi studiosi, è quello relativo all'evoluzione dei sistemi materiali per la riduzione del minerale in metallo.

Per le fasi più antiche della storia dell'uomo l'archeologia è l'unico strumento attraverso il quale si può tentare una classificazione dei sistemi materiali. Se si escludono pochi frammenti, riferibili al mondo greco e a quello romano, le fonti scritte non subentrano che nel tardo Medioevo a gettare una modesta luce su questo importante settore della cultura materiale, viceversa per l'età Moderna i testi e più in generale la documentazione scritta rappresentano una fonte talora esauriente.

La grande articolazione dei sistemi produttivi nella metallurgia del ferro sottolinea il notevole fermento tecnico e sperimentale a cui il settore è andato soggetto. Un gruppo di manufatti in ferro scavati nei livelli dell'antica e media età del Bronzo di Kaman-Kalehöyük nell'Anatolia centrale sembrano indicare i primi timidi tentativi di ridurre in metallo i minerali di ferro¹, verosimilmente facendo uso degli stessi sistemi termotecnici impiegati per la produzione del Rame.

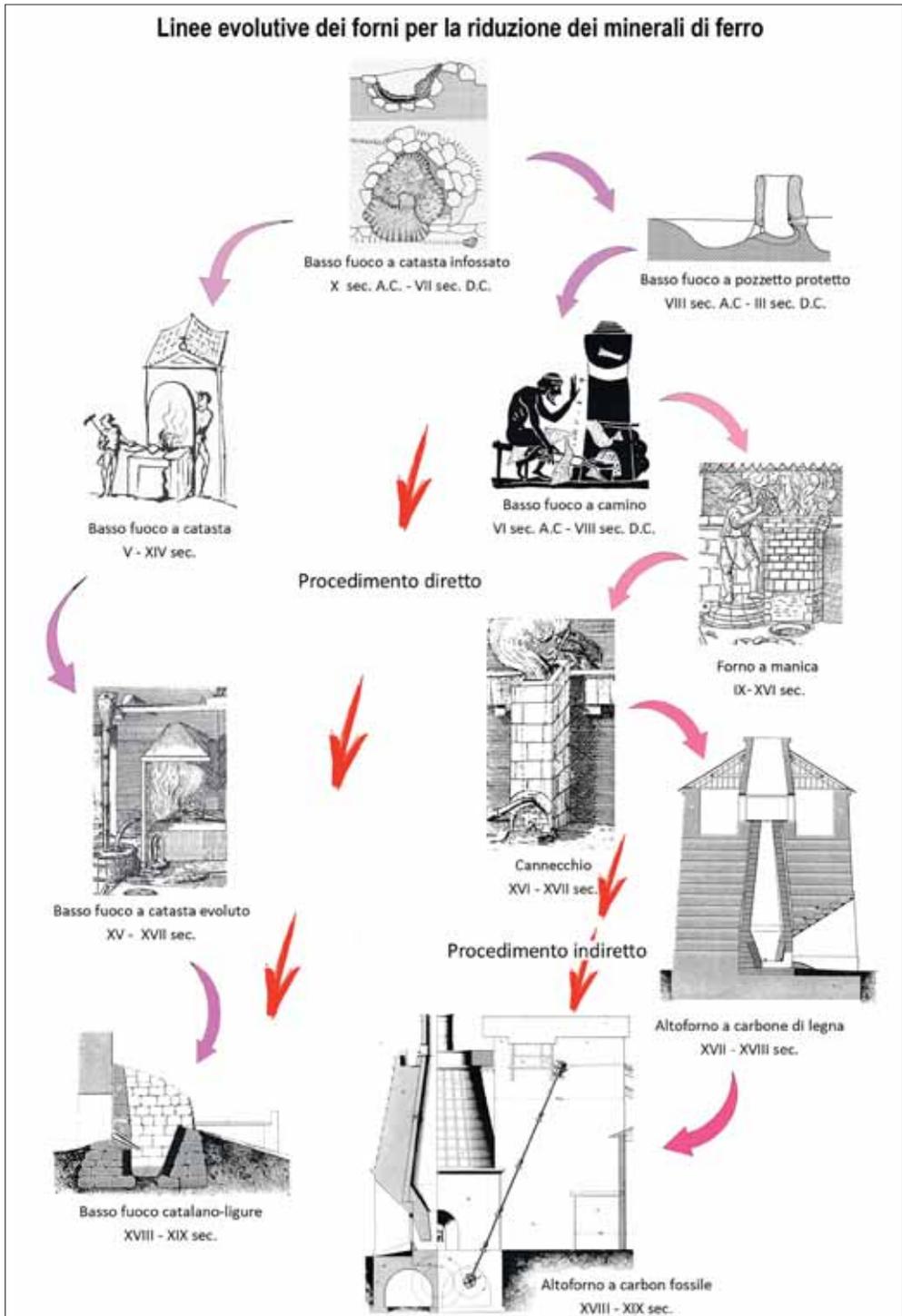
Le prime fasi di questo ramo della tecnologia metallurgica sono caratterizzate dall'impiego di sistemi materiali piuttosto elementari, derivati direttamente dal focolare aperto, sul quale i primi metallurgisti hanno praticato la metallurgia del rame. Il basso fuoco a catasta, talora infossato, ne è la derivazione immediata e risulta un sistema largamente diffuso durante l'età del Bronzo per produrre rame nella prima età del Ferro². Nelle fasi più tarde, riferibili alla seconda età del ferro, si riscontrano impianti di basso fuoco a camino che sottolineano l'elaborazione di nuovi sistemi, forse sollecitata dall'esigenza di incrementare la produzione e la qualità del prodotto³.

Il forno a camino, lontano antesignano di quello che sarà l'altoforno messo a punto tra XVI e XVII secolo, è una struttura chiusa che può interpretarsi come la ricerca di una maggiore protezione del focolare rispetto al raffreddamento indotto dall'atmosfera libera e di conseguenza di una maggiore resa del sistema. Con l'evoluzione tardo-medievale delle strutture metallurgiche, la forma chiusa, derivata dal forno a camino, grazie alla crescita strutturale, consente il raggiungimento di temperature più elevate, in grado di condurre a fusione il metallo, realizzando la lega ferro-carbonio, ovvero una ghisa grezza (detta ferraccia), che in un primo tempo i ferrieri non apprezzarono data la notevole fragilità e le modeste qualità meccaniche. Soltanto con la definizione dei processi di affinazione, questo procedimento produttivo - definito "metodo indiretto" - ha acquisito un notevole slancio soprattutto per la più elevata produttività e la maggiore

¹ Kucukarslan 2023, p. 291.

² Tylecote 1987, p.151, Tylecote 1979, p. 60 e De Santis 2019, p. 140.

³ A partire dalla metà del primo millennio a.C. si registrano presenze di bassi fuochi a camino, sia nell'iconografia greca ed etrusca (v. i vasi dipinti di VI secolo a.C. - p. 41), sia a livello di struttura materiale rinveniente negli scavi.



Schema raffigurante le tappe salienti dell'evoluzione dei sistemi produttivi del ferro a partire dai forni protostorici costituiti dai minuscoli fornelli a pozzetto o a catasta, fino ai grandi altiforni sette-ottocenteschi a carbon fossile.

facilità nel produrre un metallo maggiormente depurato da cui trarre gli acciai.

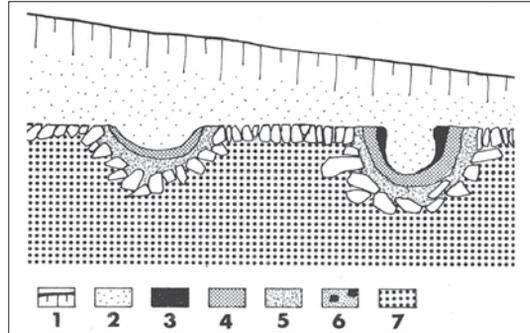
Molti sistemi produttivi antichi offrono una varietà strutturale articolata che va dal semplice focolare aperto con un minimo di protezione disposta sistemando dei materiali leggeri, fino al forno a camino, dove il fuoco è contenuto in una camera protetta.

La sopravvivenza, nella metallurgia del ferro, di una notevole varietà di sistemi di produzione, distinti nei due grandi filoni del basso fuoco e del forno a camino (più tardi evoluto nel forno a manica per concludere l'evoluzione nell'altoforno), induce a

presumere uno sviluppo non univoco della tecnologia, pure se permeata da consistenti scambi tecnici e processi di osmosi delle conoscenze tra i diversi distretti produttivi. Per spiegare questa articolazione che vede sopravvivere il basso fuoco fino al XIX secolo quando la tecnologia siderurgica è ormai approdata a sistemi tecnologici evoluti come l'altoforno occorre considerare le dimensioni dei sistemi produttivi. Durante l'intera storia evolutiva della tecnologia siderurgica, accanto a strutture materiali realizzate per semplice trasformazione del processo produttivo del rame (rappresentati dal focolare aperto a carbone di legna evoluto nel basso fuoco catalano-ligure), si registrano strutture più sofisticate come i bassi fuochi a camino, nelle diverse articolazioni, forse più congeniali alla riduzione di particolari qualità di minerale e a elevati volumi produttivi.

Il basso fuoco nelle versioni a catasta e nella versione infossata a pozzetto, pur risultando presente in molti distretti minerario-metallurgici europei, non fornisce spunti di crescita tecnologica significativa, al punto che ancora nel XIX secolo, in piena età Industriale, i bassi fuochi piemontesi del sistema catalano-ligure, detto anche "brossasco" non sono dissimili da quelli medievali. Così lo stesso forno catalano, pure più evoluto, al di là delle dimensioni presenta lo stesso schema dei sistemi antichi.

Un differente destino nella storia della tecnologia metallurgica è riservato al basso fuoco a camino. Questa struttura compare in Europa già nel I millennio a.C., nei distretti produttivi della Grecia antica e dell'Etruria per affermarsi presso le popolazioni celtiche



Bassi fuochi a pozzetto della prima età del Ferro (Huttenberg - A). 1. Rizzosfera; 2. Suolo; 3. Scorie; 4. carboni; 5. Concotto; 6. Detrito con scorie; 7. Substrato. (Da Coghlan).

(Sotto) Basso fuoco a catasta per la metallurgia del ferro scoperto nei livelli protostorici del Foro di Cesare (Roma), datato al VII secolo a.C. (Da De Santis et al.).

centro-europee. Questa tecnologia assume il ruolo di elemento portante dell'evoluzione tecnologica medievale, quando i metallurgisti di diversi distretti europei mettono a punto la struttura del forno a manica. Di qui, per successive crescite dimensionali e strutturali, negli ultimi secoli del Medioevo il sistema del forno a manica consente, all'ambiente tecnologico delle valli bresciane e bergamasche, come a diversi distretti franco-germanici, la messa a punto dei primi altiforni⁴.

La successione temporale di eventi che ha definito le trasformazioni delle strut-



Resti di un basso fuoco a catasta per la produzione di ferro scavato presso Kanchipuram in Tamil Nadu (India), datato alla prima metà del I millennio a.C. Il piccolo solco scuro è la fistola per l'insufflazione dell'aria nella camera di riduzione.

ture materiali dei sistemi di riduzione del minerale di ferro in metallo sono piuttosto incerte. Sulla base dei dati attualmente disponibili è possibile una prima schematizzazione generale che pare potersi fissare nei seguenti punti:

A. Formazione dei primi sistemi a catasta e a pozzetto nei secoli finali del II millennio a.C., per derivazione dalle strutture già in uso per la metallurgia del rame;

B. Introduzione del basso fuoco a camino intorno alla metà del I millennio a.C. La struttura si presenta sotto

diverse varianti e dimensioni, ma sostanzialmente il tipo di marcia è analogo per tutte le versioni;

C. Nei secoli X e XI d.C. il basso fuoco a camino evolve nel forno a manica con ventre a sezione quadrata e profilo svasato, più tardi si trasforma ulteriormente con sagome differenti. Parallelamente viene definita la struttura materiale del forno catalano - ligure, con il profilo a pozzo rettangolare;

D. Evoluzione del forno a manica nel canneccchio a tino con sezione quadrata e profilo a doppio tronco di piramide unito alle basi, con la corrispondente crescita delle dimensioni della struttura. Numerosi indizi inducono a presumere che questa trasformazione non avvenga prima del tardo XIV secolo o più probabilmente del XV;

E. Trasformazione del canneccchio a tino in quello a crogiolo nel corso del XVII secolo e conseguente ulteriore crescita dimensionale fino alla strutturazione dell'altoforno.

Gli studi sulla storia della tecnologia metallurgica sono ancora troppo scarsi per consentire di tracciare un quadro più preciso sulle tappe dell'evoluzione dei sistemi produttivi durante le fasi più antiche del II e I millennio a.C., analogamente per i segmenti evolutivi medievali.

L'introduzione di strutture più sofisticate ed efficienti, non comporta automaticamente l'estinzione dei sistemi meno evoluti, bensì si assiste spesso alla convivenza,

⁴ Cima 1987, p. 227.

talora nella stessa area produttiva, di strutture anche molto diverse tra loro e questo fatto si spiega con le differenti esigenze produttive, definite da un lato dai grandi complessi, talora legati alle strategie governate dai sistemi statali, e dall'altro quelle dei piccoli produttori agenti nell'ambito dei mercati locali.

I due grandi modelli tecnologici del basso fuoco a focolare aperto e del forno a camino chiuso, apparentemente antitetici, hanno stimolato R. J. Forbes a cercare delle motivazioni che potessero giustificare le differenze strutturali⁵. Egli crede di interpretare la differenza tra questi sistemi materiali in relazione alle condizioni climatiche dell'area in cui il procedimento viene attuato. Su questa base egli ritiene di collocare l'origine del basso fuoco nelle aree meridionali del continente europeo, mentre propone la nascita del forno a camino nelle fredde regioni dell'Europa centro-settentrionale.

Ragioni di sbalzo termico tra l'ambiente di riduzione del minerale e l'atmosfera sono certamente fattori importanti per la buona riuscita del procedimento di riduzione, ma forse questo non è l'unico motivo che ha indotto i metallurgisti a differenziare, talora in maniera sensibile, i sistemi materiali. Un fattore che certamente ha influito sulla definizione della forma del forno è la natura chimico-fisica del minerale da trattare, come attestano tra l'altro numerosi passi negli scritti tecnici del XVI secolo. Giorgio Agricola, descrivendo i processi di produzione del ferro, presenta il basso fuoco e sottolinea che certe "vene" contenenti rame, richiedono «*maggior'opra e più gagliardo fuoco*». Viceversa, la presenza in tracce, ancorché minime, della pirite con l'ematite o la siderite, può aver indotto i metallurgisti a preferire un forno aperto che nella fase di avviamento del processo potesse completare un arrostitimento imperfetto, senza gravi danni al buon esito del procedimento. Senza l'impedimento del camino i vapori di acido solforico e le altre esalazioni nocive, possono agevolmente venire espulsi nell'atmo-



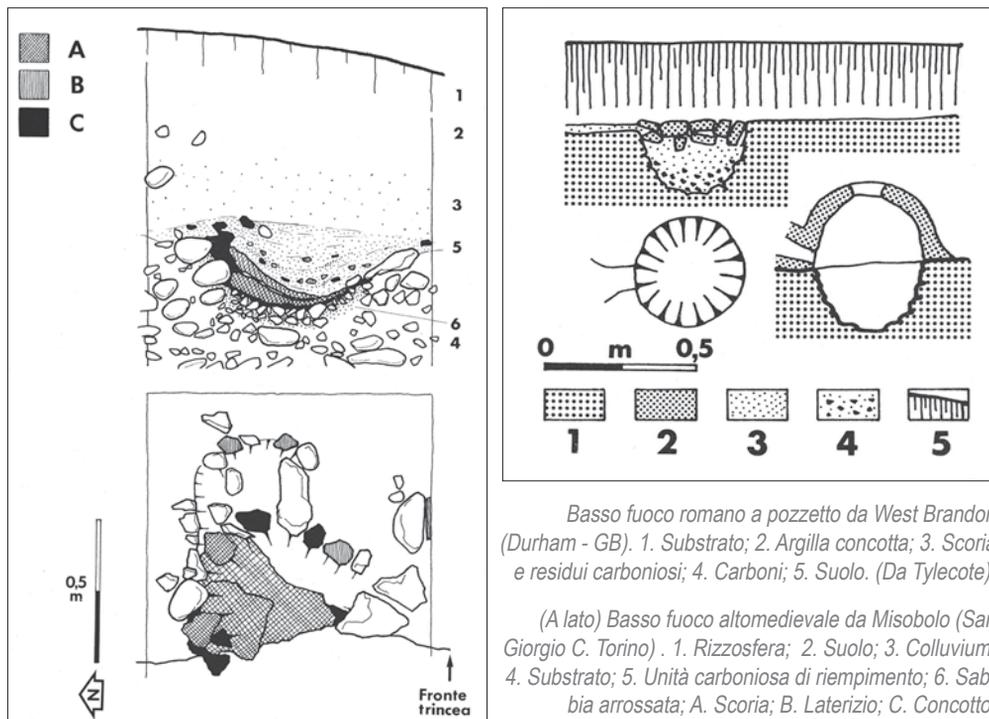
Basso fuoco a pozzetto strutturato con argilla concotta, durante il funzionamento da Montadet (Bretagna). Cultura La Tène: IV - II secolo a.C. (Fotografia Warin).

Basso fuoco di età Imperiale romana nel Weald -UK. (Fotografia Greenwood).

⁵ Forbes 1971, p. 232.

sfera senza interferire con il processo di riduzione. La conferma di questa ipotesi pare derivare, sia dal disegno del basso fuoco proposto dall'Agricola nel *De Re Metallica*, dove il metallurgista che opera intorno al fuoco porta un bavaglio protettivo, sia dalla sopravvivenza dei sistemi a focolare aperto ben oltre le fasi evolutive della tecnologia, soprattutto in quegli ambienti in cui il minerale di ferro risulta di qualità più scadente.

Un'ulteriore confutazione dell'ipotesi di Forbes deriva dalla vasta diffusione dei forni a camino anche nell'Africa sub-sahariana ed equatoriale⁶.



Basso fuoco romano a pozzetto da West Brandon (Durham - GB). 1. Substrato; 2. Argilla concotta; 3. Scoria e residui carboniosi; 4. Carboni; 5. Suolo. (Da Tylecote).

(A lato) Basso fuoco altomedievale da Misobolo (San Giorgio C. Torino). 1. Rizzosfera; 2. Suolo; 3. Colluvium; 4. Substrato; 5. Unità carboniosa di riempimento; 6. Sabbia arrossata; A. Scoria; B. Laterizio; C. Concotto.

La tesi delle origini differenti dei vari sistemi materiali, che avrebbe definito diverse scuole di metallurgia, non pare proponibile al di fuori delle fasi strettamente connesse con quella formativa. Sembra infatti potersi escludere la sopravvivenza per millenni di scuole di metallurgia che, pure disponendo di scambi tecnici e culturali consistenti, non modificano le scelte tecnologiche di fondo. Ne consegue che le diverse strutture materiali dipendono da un complesso di fattori in cui il clima appare marginale.

8.1 Il basso fuoco

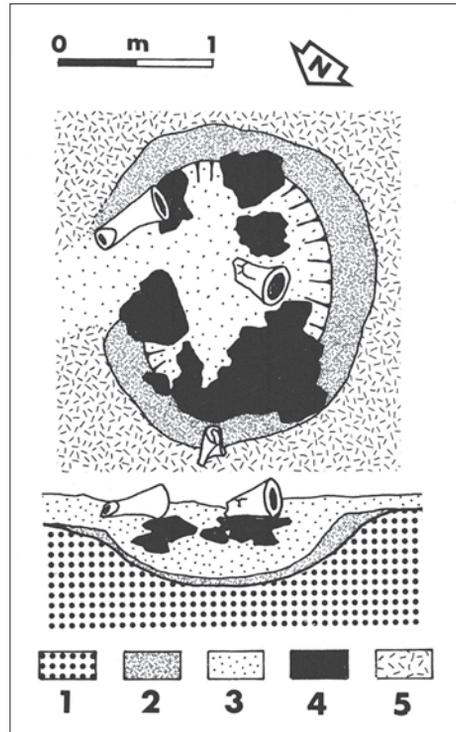
La struttura del basso fuoco a catasta con la forma di focolare aperto è il più antico sistema produttivo metallurgico, essa deriva direttamente dal focolare acceso a terra ove i primi metallurgisti calcolitici hanno verosimilmente sperimentato la riduzione di certe pietre che davano un singolare materiale plastico e lucente: il rame. Un grande

⁶ Schweinfurth. 1875, p. 202.

sistema produttivo fossile, incentrato sulla metallurgia del rame è stato studiato negli anni 1950 - 60 da Beno Rothemberg a Timna nel Sinai, dove si sono rinvenuti numerosi forni a pozzetto per la riduzione dei minerali di rame che offrono suggestive analogie con quelli impiegati nella metallurgia del ferro⁷, diffusi in tutta Europa ancora nel corso del Medioevo. Questi dati confermano che nelle sue forme più antiche la metallurgia del ferro è derivata da quella del rame, con la semplice riproduzione del fuoco a catasta, al più con qualche accorgimento per meglio proteggere l'ambiente di riduzione.

Le testimonianze archeologiche offrono informazioni a proposito della struttura materiale di questo primitivo forno sotto due differenti varianti molto diffuse in tutto il continente europeo: la forma a catasta semplice e quella infossata a pozzetto. Entrambe queste strutture si riferiscono a sistemi impiegati sin dalla Protostoria, ma in qualche caso sopravvissuti con varianti trascurabili fino al secolo XIX. È questo il caso del forno cosiddetto catalano o catalano-ligure, che nella sua versione ligure - piemontese non differisce in maniera sostanziale da analoghe strutture largamente diffuse nel Medioevo. L'archeologia riporta anche esempi di sistemi a focolare chiuso, ove la parte alta è chiusa a calotta e l'unica parte aperta è quella anteriore attraverso la quale si accede al focolare.

Paul-Louis Pelet propone una classificazione molto articolata di strutture materiali, che contrasta con quella proposta da Evrard anni prima⁸. Egli distingue due tipi di forno a pozzetto: quello tradizionale e un secondo con un piccolo crogiolo centrale cilindrico che risulta ancora attivo in Svezia nel XVIII secolo⁹. Egli riconosce ben sei forme differenti di basso fuoco a camino: tubolare, con camera a marmitta, a pancia, tronco-conica, a cupola e con camera a doppio cono o prisma¹⁰. Pure accettando questa classificazione molto accurata, si ritiene improponibile una rigida distribuzione territoriale di queste strutture, in forza del fatto che numerose evidenze archeologiche sono incomplete e spesso richiedono consistenti azioni



Pianta e sezione del basso fuoco a pozzetto con frammenti di tuyère in terracotta dal sito di Zerotin in Moravia datato al X secolo d.C. (Da Plainer ridisegnato). 1. Suolo; 2. Argilla localmente concotta; 3. Sedimento carbonioso con scorie; 4. Livelli di scorie; 5. Suolo di occupazione.

⁷ Rothemberg 1972, p. 40.

⁸ Pelet 1960, p. 205, Evrard 1960, p. 56.

⁹ Pelet 1960, p. 210.

¹⁰ Ivi, p. 211.

interpretative per stimarne la forma. Nei grandi complessi produttivi spesso si ritrovano diverse varianti della stessa struttura materiale, senza particolari differenze d'impiego. Si ritiene che, nell'ambito di una mutevole disponibilità di materiali da costruzione, di diverse morfologie del sito e differenti esigenze produttive, nonché a fronte delle peculiarità chimico-fisiche del minerale da ridurre, i metallurgisti abbiano apportato modifiche anche significative alla stessa struttura materiale, senza per questo implicare una differente tecnologia di processo. Di conseguenza, nella presente trattazione, non verranno considerate distinzioni strutturali all'interno di questa classe di manufatti.

Unica probabile distinzione è quella relativa alla temperatura raggiunta nel cuore del focolare. Nelle strutture protostoriche la scoria, al termine del procedimento, pare restare al fondo del forno e ciò è forse un indice di scarsa fluidità e quindi di temperature di riduzione basse. Nei bassi fuochi romani la scoria viene fatta defluire e questo aspetto pare confermare una buona fluidità e quindi una migliore resa termica del forno¹¹. Tale risultato è indubbiamente da attribuire a una migliore ventilazione e di conseguenza a una evoluzione delle tecniche di costruzione dei mantici.

8.1.1 Il basso fuoco a pozzetto

Questo elementare forno consta di una struttura minima, realizzata a terra mediante escavazione di una piccola buca con dimensioni che vanno da 30 cm a 1 m di diametro, solitamente rivestita di argilla, entro la quale viene posto il carbone di legna e il minerale secondo una stratificazione opportuna. Successivamente si protegge il focolare con una labile struttura di pietre e blocchi di scoria disposte in circolo a formare una cortina tutto intorno. Il procedimento di riduzione viene protratto per diverse ore, con l'aggiunta di carbone di legna e di scorificanti, di natura silicea.

Oltre alla buca e ai materiali sciolti per la costruzione della cortina, il sistema prevede l'impiego di uno o più mantici azionati manualmente per la ventilazione, posati sul terreno accanto al focolare e collegati a esso mediante una fistola in terracotta detta "tuyère". Documenti significativi a questo proposito sono noti in Polonia¹², in Danimarca¹³, in Austria¹⁴, in Gran Bretagna¹⁵ e nell'Italia Nord-Occidentale¹⁶. Tutti si riferiscono a distretti produttivi pre-romani, romani o tardo-antichi. In questo sistema l'alloggiamento del focolare nella fossa interrata va intesa come la ricerca di una maggiore coibentazione dell'ambiente di combustione dove avviene la riduzione del minerale in metallo.

La coincidenza nella forma, pure molto elementare e sovente anche nelle dimensioni, dei diversi sistemi materiali noti nell'ambiente europeo, riferibili genericamente all'orizzonte La Tène, suggerisce una certa omogeneità tecnologica. Questa caratteristica sembra doversi attribuire alla matrice comune di questo sistema che si colloca

¹¹ Tylecote 1966, p.89.

¹² Radwan 1966, p. 63.

¹³ Hingst 1981, p. 79.

¹⁴ Tylecote 1979, p. 46.

¹⁵ Tylecote 1966, p. 87.

¹⁶ Cima et al. 1987, p.173.

cronologicamente nella fase storica della siderurgia europea coincidente con un'ampia diffusione delle conoscenze tecniche.

Analisi dei documenti

Evidenze di particolare rilievo, derivano da ambienti i più disparati che riguardano l'intero continente europeo. La più antica struttura di forno a pozzetto per la metallurgia del ferro nota è quella di Huttenberg in Austria¹⁷. Coghlan pubblica due strutture riferibili alla prima età del Ferro piuttosto grandi (oltre 1 m di diametro), ricavate direttamente nel terreno e rivestite internamente da strati di scoria depositi "*in situ*" che sottolineano lo svolgimento di numerosi processi di riduzione.



Il complesso di maggiore rilievo nel quale si è rinvenuto l'impiego sistematico della tecnologia del basso fuoco a pozzetto si trova in Polonia nei centri di Nowa Slupia - Sweitomartz e Jeleniów situati nel centro minerario-metallurgico dei Monti Santa Croce¹⁸. Qui

Resti del basso fuoco della tarda età del Ferro del castelliere celtico di Bryn y Castell Hillfort - Galles - Gran Bretagna. (Da P. Crew).

un progetto organizzato nell'ambito del Comitato di Storia della Scienza e della Tecnica presso l'Accademia delle Scienze Polacca, in dieci anni di lavori condotti con l'ausilio della fotografia aerea e dei metodi geofisici, ha consentito di censire molte migliaia di forni raggruppati in complessi produttivi multipli, contenenti ognuno molte decine di piccole unità produttive. Il distretto, nel suo complesso, per il numero delle strutture evidenziate, non consente paragoni in tutto il continente europeo.

Le singole strutture produttive, constano di un piccolo pozzetto a forma di nido, del diametro variabile tra 30 e 50 cm, scavato nel loess, talora rivestito di argilla. Ogni forno dispone inoltre di una minima sovrastruttura in argilla concotta. La singolarità del sito riguarda altresì la modalità organizzativa per coppie di ranghi paralleli di quattro forni caduno, indice di una particolare organizzazione del lavoro o di disposizioni legate a motivazioni esoteriche. La collocazione cronologica dei manufatti viene proposta da Radwan al III secolo d.C., periodo nel quale pare confermato un grande sviluppo della produzione metallurgica in Polonia¹⁹. Altri esempi di forno a pozzetto derivano dai siti

¹⁷ Tylecote 1979, p. 46.

¹⁸ Radwan 1966, p. 63.

¹⁹ Ivi.

britannici di West Brandon nel Durham, Chelm's Combe nel Somerset e Aylsham nel Norfolk, scavati negli anni Sessanta del XX secolo²⁰. La prima di queste strutture è datata nell'intervallo III - I secolo a.C., mentre per le altre la collocazione è incerta²¹. Nella struttura meglio indagata di West Brandon, analogamente ai bassi fuochi polacchi, il fondo è rivestito di argilla concotta, sulla quale si è depositato uno strato di scoria. I resti della sovrastruttura propongono un manufatto in cotto, come paiono dimostrare i frammenti rinvenuti nell'unità di riempimento della cavità²². Un interessante esempio di atelier di fabbro con forni a pozzetto e altre strutture è stata scavata nel Galles a Bryn y Castell Hillfort. Un ulteriore esempio di questo tipo di struttura, datato all'età Tardo-Antica, è stato scoperto a Misobolo in Provincia di Torino. Si tratta di un basso fuoco a pozzetto del diametro di circa 35 cm, scavato nei livelli sabbiosi del substrato morenico, quindi rivestito in argilla concotta, sovrapposta da due distinti livelli di scoria. Anche in questo caso si hanno tracce della sovrastruttura in concotto e materiali sciolti²³. Il distretto minerario metallurgico altomedievale di Flensburg in Danimarca ha restituito anch'esso un basso fuoco a pozzetto²⁴, così come quello di Nemeskèr in Ungheria, entrambi inquadrabili nel IX - X secolo²⁵. Una delle evidenze più tarde è ascrivibile al X secolo e appartiene ad un atelier metallurgico scoperto a Zerotin in Moravia²⁶. Questa struttura, del diametro di circa 1,5 m, conteneva oltre ad un letto di scorie formatosi durante il funzionamento, anche due frammenti di fistole fittili coniche. Un documento analogo, del XIII secolo, proviene da Alsted nel Weald (Inghilterra)²⁷.

Pure lontano dall'Europa, va considerato il rinvenimento di forni a pozzetto allungati rinvenuti nei monti Altai, alimentati da più mantici azionati contemporaneamente e disposti con le loro fistole in terracotta nel lato lungo, datati alla tarda età del Ferro.

8.1.2 Il basso fuoco a catasta

La struttura materiale del basso fuoco a catasta appare derivata direttamente da quella del basso fuoco a pozzetto, dal momento che anche questa, come la precedente, richiede la realizzazione di una cortina chiusa di protezione del focolare, dopo che una prima fase della carica a strati di carbone e minerale è stata effettuata. Analogamente, la marcia comprende l'impiego di un sistema di ventilazione a mantice e il governo del processo "a vista", per molte ore. Questa struttura, rispetto alla variante più antica è meglio configurata, poiché solitamente comprende un piano in muratura, collocato su un basamento, sopra il quale si appronta di volta in volta il fuoco di riduzione, con la cortina di materiali sciolti. Nei documenti iconografici risulta talora protetto

²⁰ Tylecote 1966, p. 87.

²¹ Ivi.

²² Ivi e Tylecote 1979, p. 42.

²³ Cima 1987 (B), p. 187.

²⁴ Hingst 1981, p. 79.

²⁵ Gomorij 1984, p. 131.

²⁶ Plainer 1963, p. 187.

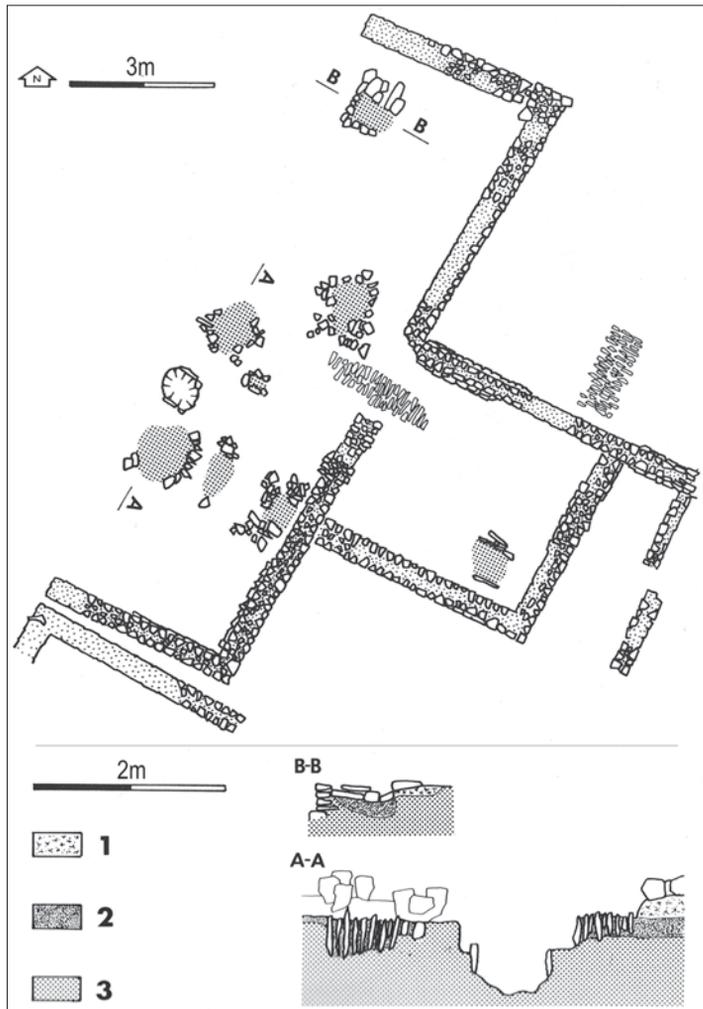
²⁷ Cleere, Crossley 1985, p. 102.



Fornace a letto allungato e ventilazione multipla attuata da una batteria di mantici disposti nel lato lungo, rinvenuta in Siberia meridionale, di VII - VIII sec. d.C., (Da Vodyasov et al. 2021).

(In alto a destra) Resti del basso fuoco cinquecentesco a pianta allungata di Mulin-Glinet di Beaussault (Seine-Maritime - Bretagna). La struttura disponeva della bocca nel lato stretto e due mantici a tergo collegati fistole in concotto ancora visibili nel complesso esposto con lo scavo. Sebbene distanti geograficamente e cronologicamente le due strutture mostrate sopra offrono qualche affinità. (Da Colliou 2005).

(A lato) Planimetria generale al termine dello scavo dell'area produttiva metallurgica di Alesia (Alise-Sainte-Reine - Côte-d'Or - Francia) con evidenza di alcuni bassi fuochi a catasta, mostrati in sezione. 1. Deposito carbonioso; 2. Unità a carbone e scorie; 3. Suolo di occupazione antico.



da una parete dietro la quale è posto il mantice, e talora una cappa per la raccolta e l'evacuazione dei fumi completa l'impianto nel caso di collocazione della struttura all'interno di un edificio. L'evoluzione del basso fuoco a pozzetto in questa direzione obbedisce forse alla necessità di disporre di un unico sistema materiale, sia per la riduzione del minerale, sia per la forgiatura del metallo. In quest'ottica, il basso fuoco a catasta rappresenta una struttura versatile e polivalente, fulcro del sistema produttivo siderurgico antico, presente nella fonderia e nella fucina di trasformazione. I numerosi



Basso fuoco a catasta di orizzonte La Tène forse elevato con un modesto camino dalla foresta di Bellaire (CH). (Da Perret).

(Sotto) Basso fuoco di Nivolet Le Désert Savoie (F) datato al C14 a XI-XII secolo. (Da Mélo).

di protezione dei mantici, disposto secondo uno schema ben noto. Un ulteriore esempio di basso fuoco a catasta gallico proviene dall'oppidum di Camp d'Artus (Helgoast)

²⁸ Mangin 1982, p. 237 e Guillot, Fluzin 2006, p. 251.

²⁹ Mangin 1981, p. 243.

documenti storici e archeologici, distribuiti nell'arco di molti secoli, sono tutti concordi nel presentare una struttura materiale omogenea, completa di basamento e cappa per la raccolta dei fumi.

Analisi dei documenti

Relativamente alla struttura del basso fuoco a catasta sono note Alcune evidenze di età romana sono note nella città gallica di Alesia, ove diversi fuochi sono situati all'interno di un grande edificio di fonderia²⁸ che ha restituito grandi quantità di scorie. Visto il contesto, queste strutture probabilmente venivano utilizzate indifferentemente come basso fuoco e come forgia. La datazione su campioni C14 è al III secolo d.C.²⁹ e i resti consistono in strutture sommarie, chiaramente identificabili in stratigrafia grazie ad un consistente deposito carbonioso, ricco di scorie, contenuto in una labile struttura in pietra a secco. Due casi riportano il sottofondo del focolare realizzato mediante l'infissione verticale di un gran numero di lastre litiche accostate. Nessuna delle strutture ha restituito tracce della tuyère. Con ogni evidenza in questi sistemi durante la marcia il fuoco si proteggeva mediante materiali sciolti non conservati, ad eccezione di due che hanno restituito tracce del muro

in Bretagna ed è inquadrabile nell'orizzonte La Tène. In questo caso la struttura si trova in un complesso comprendente diversi bassi fuochi e forni di arrostitimento³⁰. Altre strutture produttive, inquadrabili nello stesso orizzonte e riferibili al basso fuoco a catasta, sono state scoperte in occasione dei lavori di costruzione di un'autostrada nel Berry³¹. Della stessa epoca sono i bassi fuochi strutturati in muratura con un basso camino, scoperti nella foresta di Bellaire a Romainmotier nel Giura Vodese³². Tra questi, la struttura n X è stata datata con buona precisione al radiocarbonio con una data calibrata che rimanda alla fine del IV secolo a.C. Strutture analoghe con labili elevati, talora in argilla, sono note in Bretagna a Paimpont nel dipartimento di Ille-et-Vilaine³³ e a Notre-Dame-de-L'Isle nel dipartimento francese dell'Eure³⁴.



Miniatura della ferriera dal Salterio di Stoccarda (dipinto su pergamena), datato al terzo decennio del IX secolo.

A seconda delle località, le tipologie di bassi fuochi risultano dimensionalmente piuttosto differenti ma viene mantenuta nel complesso una fisionomia strutturale piuttosto omogenea.

L'immagine di un basso fuoco a catasta più tardo è offerto dal Salterio di Stoccarda datato (810-820), dove una miniatura mostra una ferriera con il maestro nell'atto di martellare il blumo incandescente all'incudine mentre l'aiutante accudisce al basso fuoco disposto a terra e rappresentato con una sommaria protezione a catasta, azionando al contempo i mantici a sacca di pelle. Di pochi anni successiva è una miniatura del Salterio di Utrecht compilato a Reims tra l'816 e l'835 su commissione dell'abate e arcivescovo Ebbone³⁵. Qui si vede il maestro nell'atto di estrarre il blumo dal basso fuoco rialzato da terra con le grandi tenaglie e l'aiutante dietro al muro di protezione, verosimilmente intento ad azionare il mantice. In questo caso l'attività di riduzione del minerale sembra confermata dalla colata scura ricadente a terra, interpretabile come la fuoriuscita della scoria liquida al termine del processo. Queste documentazioni riportano dei piani di fucina utilizzati indifferentemente come bassi fuochi a catasta e come forge. La miniatura del Salterio di Stoccarda offre un suggestivo parallelo con il basso fuoco di Nivolet Les Déserts (Savoia). Anche in questo caso la struttura va interpretata

³⁰ Galliou 1982, p. 27.

³¹ Railland 1987, p. 226.

³² Pelet 1971, p. 54 e Perret et al. 2013, p. 34.

³³ Jouanet 2008, p. 64.

³⁴ Nolwenn 2021, p. 372.

³⁵ Salin 1957, p.64 e van der Horst, Noel, Wüstefeld 1996, p. 132.

in un ampio sistema produttivo, dove avviene indifferentemente il trattamento del minerale e quello del riscaldamento dei masselli nel processo di fucinatura.

Un esempio di basso fuoco a catasta è stato scoperto a Rocca San Silvestro nell'Italia Centrale³⁶. Qui la struttura produttiva si trova entro un edificio collocato a breve distanza dal nucleo abitato, destinata a ferriera e fucina. Lo scavo ha consentito di identificare l'accumulo di materiali carboniosi e scorie che intasava il piano di lavoro, nonché la base del muro rettilineo posto a protezione dell'impianto del mantice. La datazione



Miniatura del Salterio di Utrecht (IX sec.), dove è illustrato il basso fuoco a catasta sul quale si svolge indifferentemente forgiatura e metallurgia del ferro evidente in quella che appare una colata di scoria.

è al XIII secolo d.C.³⁷. Questa struttura concorda piuttosto bene con quelle canavesane di Brosso e dell'ambiente dell'Orco, databili al tardo Medioevo³⁸. Nei distretti metallurgici del nord-ovest italiano si conservano numerosi esempi di questa tipologia di bassi fuochi alcuni dei quali sono rimasti in uso per lungo tempo fino ai secoli XVII-XVIII³⁹. A documentare la struttura materiale valgono i rilievi di età Napoleonica che, al di là dei differenti sistemi di insufflazione dell'aria, mostrano strutture simili a quella del nel Salterio di Utrecht di IX secolo. (V. p. 137).

Informazioni di dettaglio, accompagnate da descrizioni particolareggiate delle strutture materiali, sono contenute nei trattati tecnici medievali, tardomedievali e moderni. Il basso fuoco a catasta medievale, a differenza di altri sistemi materiali è una "tecnologia matura", come conferma il fatto che le descrizioni fornite dagli scrittori tecnici coevi confermano la struttura materiale già nota a Teofilo.

La letteratura metallurgica tardo-medievale e moderna è ricca di documentazioni e anche di iconografie, relative a questa struttura produttiva, richiamata e descritta da tutti gli scrittori tecnici a partire dal Biringuccio che precisa⁴⁰: «...*Le basta una semplice fucina, et un par di mantacci non molto maggiori che comuni e conciasi al detto suo luoco a similitudine d'un monticello havendola prima rotta in pezzetti come noci, et dintorno fattoli una clausura in forma di circolo di più grossi pezzi di miniera, ovvero daltre pietre mortigne qual solo vi si mettano, per che retenghino il carbone el fuoco stretto, con el quale carbone quella che volete ridurre benissimo si copre...*».

³⁶ Francovich 1986, p. 313.

³⁷ Ivi.

³⁸ Cima 1985, p. 525.

³⁹ Baraldi 1979, p. 159.

⁴⁰ Biringuccio 1540, p. 16.

Analoga descrizione è fornita dall'Agricola⁴¹: «...la vena del ferro ch'è di particolar bontà bisogna che si cuoca ne la fornace ch'è quasi simile a la seconda. Il focolar bisogna che alto sia tre piedi e mezzo, largo e lungo cinque piedi, nel mezzo del quale deve essere un catino alto un piede, e largo un piede e mezzo. Benché si può fare più alto, più basso, più largo e più stretto, secondo che de la vena si fa più o men ferro, o molto o poco che di quella far se ne possa...».

Sebbene le descrizioni siano coerenti si può escludere un'influenza degli scritti del Biringuccio sull'Agricola e ciò conferma che il procedimento diretto, nel XVI secolo, è ancora praticato sistematicamente anche nei distretti d'Olttralpe.

Un secolo dopo, il Della Fratta⁴² fornisce una descrizione particolareggiata del “fuoco grosso bresciano” in tutto simile al basso fuoco catalano-ligure o brossasco che sarà descritto dai tecnici del secolo successivo, «...le parti laterali del focolaio si serrano ecetto a canto al muro, vicino al catino, dove alcuni adattano una lastra di ferro grossa mezz'oncia, che per lo luogo abbia diversi buchi uno sottoposto all'altro a fine di dare la lattaruola a suo tempo (come chiamano li maestri)...si accomoda pur anco il lusello che guarda a linea dritta nel mezzo del catino, e che sovrasti al medemo più di sei onde...». L'evoluzione che si registra nel disegno proposto dal Della Fratta riguarda il sistema di ventilazione che in luogo del mantice presenta la novità della tromba idroeolica.

Sul finire del Settecento Carlo Antonio Galleani Napione, descrivendo l'ambiente minerario metallurgico canavesano, fornisce una descrizione piuttosto dettagliata del basso fuoco cosiddetto “brossasco” in uso in Canavese (Piemonte), coerente con le strutture descritte nel XVII



Basso fuoco a catasta dal De Re Metallica di Giorgio Agricola.

Dietro il muro del forno s'intravedono i mantici e il mastro ferraio, imbavagliato a causa delle forti emissioni gassose, con la sinistra regola il flusso di aria insufflata nel fuoco. In primo piano l'impianto di maglio a testa d'asino che negli ultimi secoli del Medioevo entra diffusamente nei sistemi produttivi.

⁴¹ Agricola 1563, p. 363.

⁴² Della Fratta Montalbano 1678, p. 144.

secolo e in particolare con la descrizione del Della Fratta: «*Le fourneau dont on sert pour la fonte, n'est élevé que de 3 à 4 piéds audessus du sol de la fondérie, et c'est une espèce de cheminée qui s'élargit beaucoup vers le bas, et qui s'enconce environ un piéd dans la terre. Cette partie inférieure du fourneau est pourvue d'un trou qui communique à une bassin carré que l'on y a cueusé tout près dans le sol de la fondérie: l'on tinent ce trou fermé avec de l'argile pendant la fonte et l'on ouvre ensuite lateral une embrasure suffisante pour les soufflets, et l'on y place une tuyère de cuivre battu, à la quelle on donne une très-grande inclination, et qui s'avance environ jusqu'à tièr de la largheure du fourneau comme la partie du fourneau qui se trouve hors de terre est ouverte et sans maçonnerie sur le davat, on y forme pendant la fonte une espèce de mur avec de la braque humectée qui l'on arrangee succesivement sur una pierre forte placée entre le fourneau et le bassin de reception des scories*»⁴³.



Il "fuoco grosso bresciano" descritto dal Della Fratta Montalbano. Come si può vedere il sistema è del tutto simile a quello mostrato un secolo prima dall'Agricola ma qui al posto dei mantici c'è la tromba idroeolica. Si tratta di un basso fuoco a catasta impiegato per affinare la "ferraccia".

*elle strutture citate dal Galleani Napione si hanno diverse immagini nei rilievi predisposti in occasione dei censimenti napoleonici dei sistemi metallurgici dell'Impero Francese*⁴⁴. Alcuni rilievi sono ricchi in dettagli dei singoli macchinari della ferriera riproducendo fedelmente sia i bassi fuochi, sia le altre infrastrutture tecnologiche⁴⁵.

8.1.3 Basso fuoco catalano-ligure

L'evoluzione del basso fuoco a catasta nei secoli XVIII e XIX conduce ad una struttura materiale piuttosto consistente che trova la sua definizione più completa nel forno

⁴³ Galleani Napione 1979, p. 159. Come si vede il Galleani che scrive nel 1768 cita ancora i mantici.

⁴⁴ AST, Mazzo Ferrieri.

⁴⁵ Galleani Napione 1979, p. 159.

definito catalano - ligure⁴⁶. Si tratta di un basso fuoco a pozzo, ove il focolare è contenuto in una fossa rettangolare scavata nel terreno e protetta ai lati da muri in pietra refrattaria solitamente connessa a secco.

Il forno in questo caso è appoggiato a un muro che serve da protezione del sistema di ventilazione. Al lato anteriore un terrapieno consente l'accesso alla bocca della struttura per le operazioni di carico e governo del processo, mentre un altro reca un'apertura attraverso la quale far defluire le scorie.

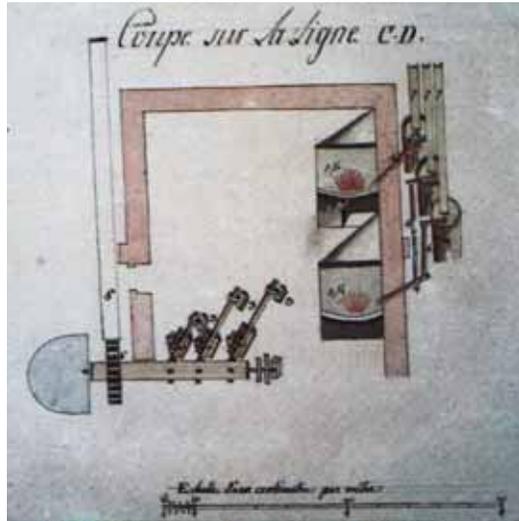
Nelle strutture più recenti il sistema di ventilazione a mantici è solitamente sostituito dalla tromba idroeolica di cui il Della Fratta Montalbano fornisce una delle più antiche descrizioni note⁴⁷. Come negli altri sistemi a focolare aperto, il processo viene governato dai ferrieri attraverso l'apertura superiore che consente di raggiungere direttamente l'ambiente di riduzione mediante opportuni attrezzi a manico lungo.

Analisi dei documenti

Una fonte significativa per la ricostruzione di una ferriera tardo-medievale incentrata sul basso fuoco nella versione catalano-ligure è rappresentata da una serie di estimi genovesi della seconda metà del XV secolo⁴⁸. Questi descrivono la strutturazione della ferriera comprendente il basso fuoco per la riduzione del minerale e il maglio meccanizzato. La ventilazione è garantita da coppie di mantici (*"par unum mantexorum"*), azionati anch'essi dall'energia idraulica (*"rota mantexorum"*)⁴⁹. Di rilievo il fatto che nella ferriera dei marchesi d'Invrea a Ponte d'Invrea (Genova), nell'estimo del 1619, circa cinquant'anni prima della descrizione del Della Fratta, in luogo dei mantici risulta già un impianto di tromba idroeolica⁵⁰.

Nonostante non si conoscano casi di rilievo o di scavo di strutture di questo tipo, i disegni, a corredo dell'opera di Walter De Saint Ange eseguiti prima del 1835, riportano la pianta, il prospetto e la sezione della fucina di Ria nei Pirenei Orientali che ha il valore di un documento archeologico⁵¹ e coincide con le descrizioni dei sistemi liguri.

Tra la documentazione di rilievo per l'archeologia di questo tipo di forno si segnala



Bassi fuochi alla brossasca da un rilievo di età Napoleonica eseguito in una fucina di Brosso dotata di una batteria di magli a testa d'asino azionati da un unico albero motore. A tergo dei fuochi le trombe idroeoliche per l'insufflazione dell'aria.

⁴⁶ Baraldi 1979, p. 159.

⁴⁷ Della Fratta Montalbano 1678, p. 146.

⁴⁸ Baraldi 1979, p. 119.

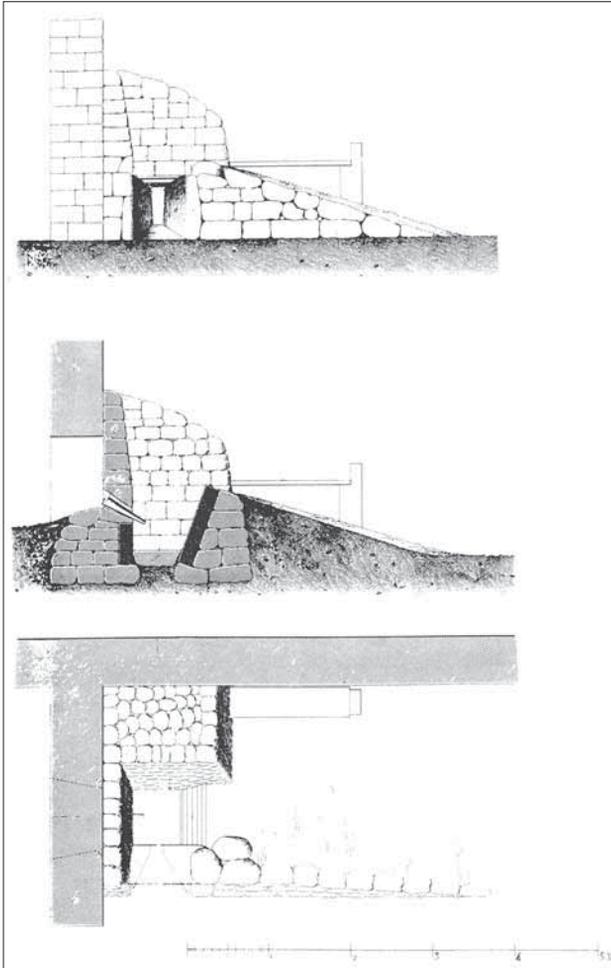
⁴⁹ Ivi, p. 121.

⁵⁰ Ivi, p. 119.

⁵¹ De Saint Ange 1835-38, seconda parte pl. XXXVI.

anche il trattato “Arts des forges et des fourneaux à fer” del Marchese Courtivron e M. Bouchu pubblicato nel 1762 che offre una notevole tavola iconografica⁵², oltre a numerosi rilievi eseguiti in età Napoleonica di cui alcuni sono conservati nell'Archivio Dipartimentale di Perpignan e altri nell'Archivio di Stato di Genova⁵³. Come di consueto, il basso fuoco catalano è inserito nel complesso produttivo piuttosto della ferriera con il maglio per l'operazione di condensazione del massello.

Come già osservato, la tecnologia del basso fuoco, benché complessivamente



Prospetto, sezione e pianta del basso fuoco catalano-ligure (altrimenti detto “fuoco grosso”), rilevato da W. De Saint Ange negli anni Trenta dell'Ottocento nella ferriera di Ria nei Pirenei orientali. Semplici forni come questo sono rimasti in attività fino alla metà del XIX secolo.

del basso fuoco, sono quello pirenaico, quello ligure e in misura limitata quello canavesano.

⁵² Lepassat R. s.d, p. 5.

⁵³ Archivio di Stato di Genova pacchi 156-226.

⁵⁴ Brocchi 1802, p. 35.

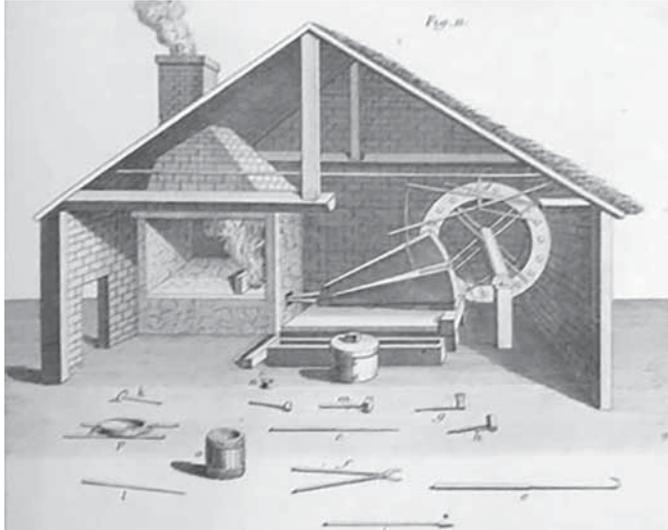
obsoleta e fortemente limitata rispetto ai volumi produttivi, è ancora diffusa all'esordio del XIX secolo e questo si spiega con la sua sostanziale semplicità strutturale, secondo la quale un qualsiasi fuoco di forgia, con poche modifiche può essere approntato come basso fuoco e di conseguenza consente la produzione anche alle strutture che agiscono nell'ambito dei mercati locali.

Giovan Battista Brocchi, nel suo trattato del 1802 “Memorie sulle miniere del dipartimento del Mella”⁵⁴, giunge addirittura a proporre questa tecnologia come elemento risolutore della crisi di obsolescenza in cui versa la metallurgia delle valli bresciano - bergamasche. Egli apprezza in particolare la versatilità e il basso costo di questo sistema.

Dopo gli anni della Restaurazione e la conseguente crisi dei mercati gli unici poli europei attivi con presenza strutturata

In altri distretti produttivi, il basso fuoco è presente nel ciclo di produzione indiretto come fuoco di affineria per la riduzione della ghisa in acciaio e questo è un altro dei pregi di questa tecnologia che presenta notevoli aspetti di versatilità. In Liguria Cesare Baldracco, ingegnere delle miniere del Piemonte, nel 1847, perdurando la crisi del mercato del ferro, tenta una patetica ristrutturazione di un basso fuoco dotandolo di una volta a riverbero *«ponendo soprattutto a profitto la grande quantità di calore disperso dalla fiamma che copiosa sollevasi dai focolari...»*⁵⁵, ma è un tentativo misoneista di ripristinare una tecnologia obsoleta, ormai priva di significato economico.

Le descrizioni tecniche riferibili a questo tipo di struttura produttiva sono numerose ancora nel XIX secolo. Da segnalare come particolarmente rilevante la descrizione del forno catalano-ligure fornita da J. M. Muthuon del 1808⁵⁶. *«Les fourneaux sont formés de quatre plans au coté opposé, le contrevent; celui de derriere, la rustine; celili de devant le laiterol ... Dans le fourneau catalan, la rustine et le contrevent inclinent en dehors... Dans le fourneau navarrais et biscayen, quelquefois la varme seule est perpendiculaire, mais le plus souvent le contrevent et le laiterol sont seul evases...»*



La tavola di Courtivron e Bouchu del 1762 con il basso fuoco catalano.

Walter De Saint Ange nel già citato trattato "Metallurgie Pratique du fer"⁵⁷ mostra di conoscere a fondo la distribuzione territoriale delle singole varianti iberiche, mentre ignora le strutture italiane ormai in fase di avanzato declino. Egli distingue tre tipi differenti di basso fuoco: catalano, biscagliano e navarrese. I forni navarresi secondo il tecnico ottocentesco sono più grandi degli altri e sono diffusi nei bassi Pirenei e nella Navarra spagnola, mentre quelli biscagliani si trovano in tutta la Spagna. La descrizione che fornisce è del tutto coerente con quella della ferriera ligure detta 'Tripalda' di Sassello (Liguria), descritta dettagliatamente negli anni successivi dal Baldracco. *«Le fourneau catalan... est rectangulaire, ses cote sont plans, dont deux verticaux, la varme et le laiterol; la sole, ordinairement en pierre, est au niveau du sol de fusine. On en fait usage au centre et dans la partie orientale des Pyrenées... Les forges sont*

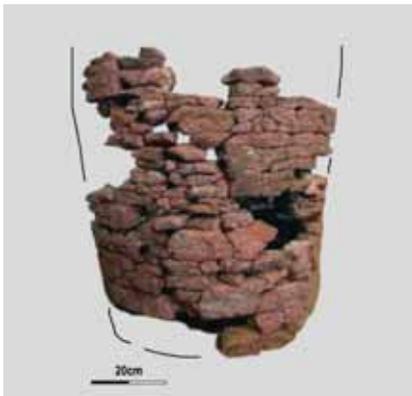
⁵⁵ Baldracco 1847, p. 10.

⁵⁶ Muthuon 1808, p. 52.

⁵⁷ De Saint Ange 1835, p. 10.

alimentés d'air par des soufflôts ou par des trompes, mais plus généralement par ces denieres machines».

Da Cesare Baldracco, che scrive nel 1844, apprendiamo che in piena età Industriale, quando gli altiforni a carbon fossile dotati di sofisticati sistemi di recupero di calore per il riscaldamento dell'aria da immettere nella camera di combustione sono una realtà, la struttura materiale del vecchio basso fuoco non è mutata. Alla ferriera Tripalda il «*focolare detto dai ferrieri pozza, fossa o fuoco, è essenzialmente formato da quattro pareti. E' esso stabilito sul suolo tra un massiccio in muratura di rozze pietre (il fucinale) e contro un grosso muro detto la croгна ossia "boccolare" ed ha uno spazio laterale coperto da una piastra di ferraccio (la banchetta) davanti alla quale lavorano i ferrieri*»⁵⁸. Ogni ciclo produttivo al basso fuoco, a seconda delle tipologie dura da 8 a 12 ore.



Basso fuoco La tène di La Forêt à Auvers-le-Hamon - Orne (F). (Da Nolwenn 2021).

(Sopra) Ricostruzione delle parti alte del camino fittile eseguita connettendo i frammenti del decadimento antico recuperati nello scavo.

formative bassi fuochi a camino, con il focolare .protetto e la possibilità di carica dall'alto sono presenti nei distretti siderurgici dell'area mediterranea sin dal VI secolo a.C e si riscontrano in quelli continentali europei a partire dal IV - III secolo a.C.

La dimensione di questi forni è piuttosto variabile, ma di rado supera in altezza i due metri e, ancora una volta, risulta accomunato con l'analoga struttura per la riduzione dei minerali di rame. Questo fatto conferma che nella metallurgia antica le strutture materiali legate ai singoli processi di riduzione erano condivise da sistemi tecnologici diversi, adattati alle singole esigenze in base ai sistemi di conduzione del processo.

I materiali costruttivi riscontrati nei numerosi casi studiati nei siti archeologici vanno dalle pietre refrattarie ai laterizi connessi con argilla o impasti di varia natura, fino alla

⁵⁸ Baldracco 1847, p. 10.

semplice argilla, che consentiva la modellazione del camino con le tecniche “a lumicino”, tipiche della costruzione dei vasi. La camera di combustione è quasi sempre circolare infossata e il camino cilindrico, eretto direttamente su di essa. Più raramente si riscontrano sezioni rettangolari. In basso è collocata l’apertura di scarico frontale, disposta alla base e sui fianchi sono collocate le fistole (tuyère) connesse ai mantici, manuali. In qualche caso sono noti forni a ventilazione naturale con alimentazione favorita da un certo numero di aperture basali. Forni di questo tipo sono descritti negli anni

1870 dall’esploratore George Schweinfurth che li osserva presso le popolazioni Diors dell’attuale Sudan. Come già osservato, i forni a camino sono diffusi in tutta l’Africa e restano in funzione fino ai primi decenni del Novecento, come documentano le fotografie scattate dall’esploratore Lanfant nell’Africa Centrale⁵⁹ che nel suo rapporto di viaggio presenta una fotografia pubblicata nel 1909



Bassi fuochi da ferro nel distretto siderurgico di Bassar (Togo centrale), dove i primi impianti di forni a camino noti risalgono al IV secolo a.C.

di un forno a camino singolarmente simile a quelli illustrati nel kylix attico e nel vaso etrusco di Vulci (v. figure a p. 44 e 45)⁶⁰. L’archeologo statunitense Philippe de Barros ha studiato con diverse campagne archeologiche negli anni 1984 - 86 i forni a camino del distretto siderurgico di Bassar nel Togo centrale dimostrando che i primi impianti di questa tecnologia datano al IV secolo a.C.⁶¹.

Forni a camino soltanto modificati in piccoli particolari pervengono alla tecnologia metallurgica medievale dai sistemi metallurgici consolidati durante la Protostoria e ancora in quest’epoca risultano impiegati con gli stessi processi tipici dei bassi fuochi, con la produzione di blumi spugnosi di metallo che richiedono la condensazione mediante martellatura, mentre soltanto nel tardo Medioevo si registrano significative evoluzioni con l’impostazione di strutture costruttive più solide e articolate assumendo il ruolo di forni a manica nel senso moderno del termine.

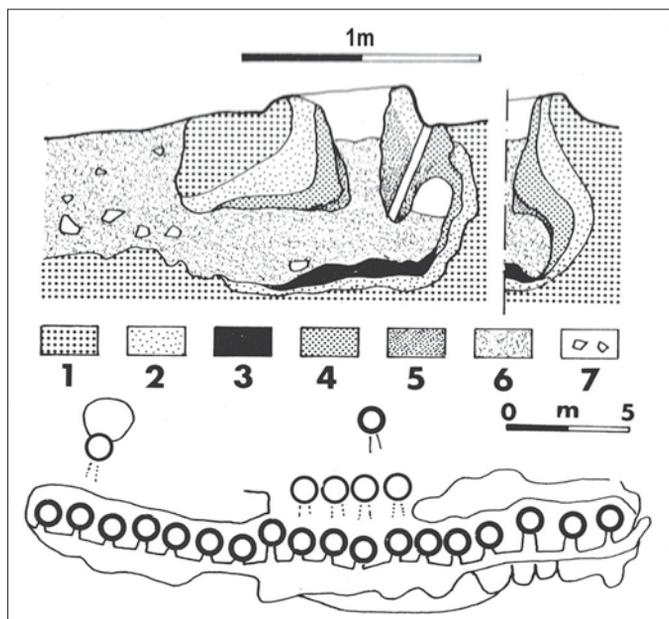
La transizione non è chiara, né si conosce il luogo in cui si sono impostati i primi cicli di riduzione con metodo indiretto. L’evoluzione appare casuale: forse un procedimento prolungato realizzato in un forno di nuova costruzione, particolarmente efficiente può aver consentito di raggiungere la temperatura di oltre 1.500°C che ha condotto a com-

⁵⁹ Schweinfurth 1875, p. 202.

⁶⁰ Lanfant 1909, p. 129.

⁶¹ De Barros 2021, p. 169.

pleta fusione il ferro. Molto spesso gli stessi forni a manica sono impiegati come blumiere con un procedimento produttivo diretto analogo a quello impiegato nei bassi fuochi. La chiave di questa dicotomia tecnologica sembra risiedere nella dimensione delle “maniche” e nel testo dell’Agricola sembra di trovare la chiave di questa evoluzione. Il tecnico rinascimentale descrive e illustra una struttura di forno a manica più grande del solito⁶²: «...fornace simile a la prima, ma molto più ampia et alta, a ciò possa tener vena assai, et assai carboni...». Lo stesso Agricola, nella descrizione del procedimen-



Sezioni di un piccolo forno a Zelechivice (Moravia - Romania), tratto dalla batteria di strutture disposte secondo lo schema planimetrico mostrato in basso. 1. Loess; 2. Loess alterato; 3. Detrito carbonioso sciolto; 4. Concotto; 5. scoria vetrificata in situ; 6. Detrito di riempimento con scorie; 7. Ammassi compatti di scoria. (Da Plainer ridisegnato).

questo tipo di struttura produttiva è la scena dipinta su un vaso etrusco a figure rosse rinvenuto a Vulci e conservato al British Museum, attribuibile alla fine del VI secolo a.C. La scena dipinta mostra con estremo dettaglio due fabbri intenti a operare intorno ad un forno dotato di un alto camino che reca alla base un’apertura attraverso la quale si accede al focolare⁶³. Dei due metallurgisti, il più anziano (raffigurato con la barba) è intento ad estrarre dal forno un massello, con l’ausilio di lunghe tenaglie, mentre il secondo attende di martellarlo con una mazza a lungo manico. Posteriormente al forno sembrano delineati i mantici a membrana sul tipo di quelli mostrati nella fotografia dell’esploratore Lenfant (v. p. 46). Questo tipo di struttura offre strette analogie fortissime con le blumiere largamente diffuse in Europa nell’alto Medioevo e con quelle africane rimaste in funzione fino al XX secolo.

⁶² Agricola 1563, p. 366.

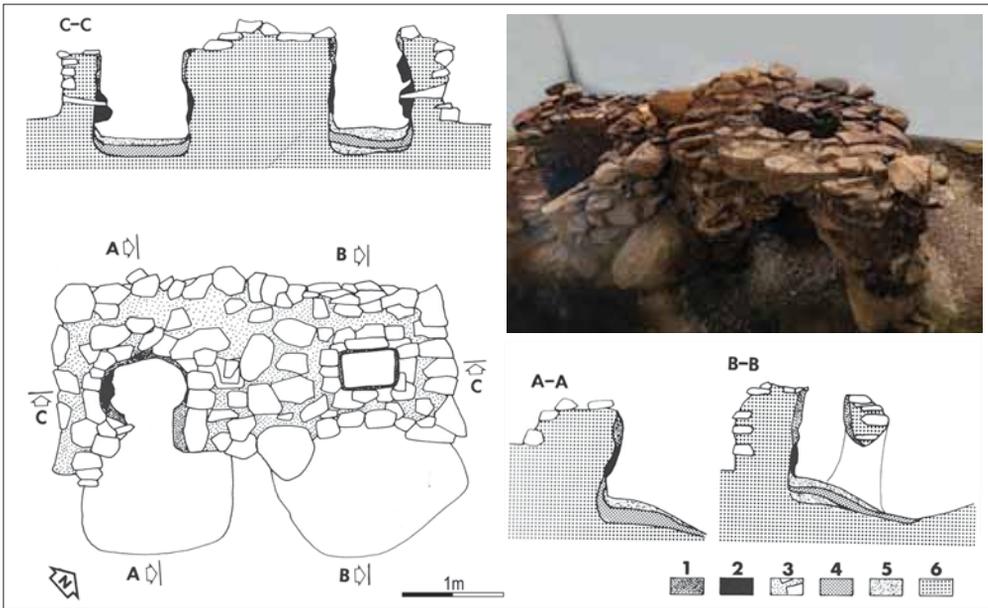
⁶³ Tylecote 1979, p. 45.

to realizzabile in queste strutture, lascia intendere la possibilità, forse quasi indifferente, di impiegare il forno nel procedimento diretto: «...di tal vena, hor una, hor due volte cotta, si fa il ferro...». Un’ulteriore conferma della versatilità delle maniche medievali deriva dall’illustrazione che riporta nella facciata un’apertura tamponata con materiali leggeri, removibili nel caso di impiego del forno per la realizzazione di un procedimento diretto.

Analisi dei documenti

Il più antico documento archeologico riferibile a

Nell'Europa continentale la presenza dei forni a camino è legata alla diffusione della cultura La Tène durante la media età del Ferro (V - IV secolo a.C.). Documenti archeologici di queste strutture sono diffusi in tutta l'area continentale. A solo titolo di esempio si citano quelli di Bibracte a Saint-Léger-sous-Beuvray⁶⁴, ove si contano ben cinque forni a camino impiegati nella metallurgia del ferro. Altri forni celtici a camino in Francia sono noti in batteria anche nella località Touzeau a Aigné nella Sarthe e al Bois de Beslan a La Milesse (Bretagna), a Les-Clérimois in Borgogna o a Neuville-sur-Sarthe nei paesi



Copia di forni da ferro a camino di età Romana dal sito di Bellaire (Giura Vodese - Svizzera) . 1. Concotto; 2. Scorie; 3. Struttura in pietre; 4. Sottofondo; 5. Sedimento carbonioso; 6. Livello sterile. (Da Pelet ridisegnato). Si tratta di una delle più antiche strutture in muratura, conservate in situ con la costruzione di un edificio di protezione.

della Loira⁶⁵. Altri sono stati studiati a Hunterpullendorf, Sendlach e a Magdalensberg in Austria, mentre uno strano forno a camino della stessa epoca, dotato di una parte in pozzo e un camino quasi cilindrico, è stato rinvenuto a Podborany in Boemia⁶⁶. Altri ancora sono stati scavati in gran numero nella montagna di Santa Croce⁶⁷ in Polonia. Un piccolo forno a camino di II secolo a.C è noto anche a Scarmagno in Piemonte⁶⁸. Uno dei più suggestivi complessi tecnologici europei ove si sono rinvenuti in gran numero i bassi fuochi a camino è quello della foresta di Bellaire nel Giura Vodese⁶⁹. Molte di queste strutture, sono un po' più tarde, datate ai primi secoli d.C. e dispongono di una forma ove è chiaramente definibile l'elevazione verticale del camino, sovrastante

⁶⁴ Dechelette 1914, p. 1543.

⁶⁵ Nolwenn 2021, p. 299.

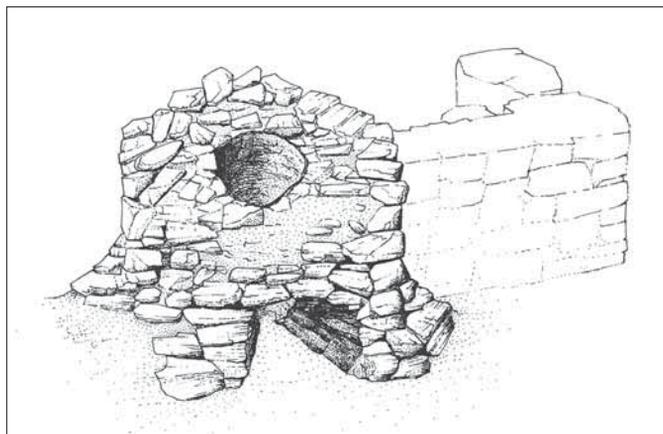
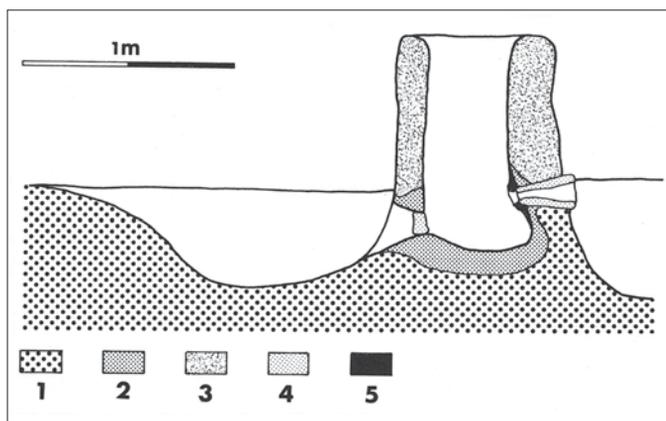
⁶⁶ Moscati 1991, p. 443.

⁶⁷ Nolwenn 2021, p. 45.

⁶⁸ Cima 2023, p. 189.

⁶⁹ Pelet 1974, p. 230. Queste strutture svizzere rappresentano un esempio di strutturazione del camino in muratura di pietre e argilla, ad anticipare la sagoma del forno a manica.

il focolare, la chiusura ai quattro lati e talora è riconoscibile anche l'apertura anteriore. In questo sito si trovano le unità di maggiore rilievo, ove sono identificabili i caratteri del basso fuoco a camino. Le più significative sono state schedate da Paul Louis Pelet con i numeri III, IV, XIX, XX. Una struttura analoga si trova a Bossen (CH), schedata al numero XXII. Tra queste evidenze si registra anche una certa variabilità nell'impiego dei materiali da costruzione. In taluni casi l'intera struttura è in pietra connessa con argilla localmente concotta, mentre in altri si riscontra in abbondanza il laterizio. Un



(Sopra) Profilo di forno a camino messo a punto nella Preistoria e rimasto in uso fino al Medioevo. 1. Suolo; 2. Concoctto; 3. Argilla impastata e laterizio; 4. Terracotta; 5. Scoria vetrificata. (Da Tylecote ridisegnato).

(Sotto) Resti del forno a camino altomedievale di Loudres - Lorena (Francia).

giunto ad appurare che gli antichi metallurgisti dopo aver ricavato la forma desiderata nel loess molto compatto, veniva rivestita di argilla refrattaria e vi era praticato, oltre al foro del camino strozzato alla base a formare un rudimentale venturimetro, anche un esile foro molto inclinato ove sistemare l'ugello del mantice. Il loess e l'argilla venivano successivamente concotti nella fase di avvio del forno (v. p. 142). Le analisi sulle scorie

⁷⁰ Brandslet 2017, p. 18.

⁷¹ Plainer 1963, p. 178.

altro forno a camino alto-medievale dello stesso tipo è noto a Barga-Hofwisen nella Svizzera tedesca e nella Norvegia settentrionale a Trøndelag⁷⁰.

Significativi appaiono i distretti produttivi cecoslovacchi di Praga e Zelechovice (Moravia)⁷¹. Nel primo sito all'inizio del secolo venne scoperto un atelier metallurgico con sette piccoli forni a camino disposti in circolo, mentre nel secondo sul finire degli anni 1950 si rinvenne un complesso produttivo dotato di 24 piccoli forni a camino del tutto simili ai primi, tagliati nel loess e alti poco meno di un metro. La struttura dettagliata di questo piccolo forno è stata ricostruita da Radomir Plainer con l'ausilio di numerose analisi di laboratorio. Egli è

hanno confermato che una simile struttura poteva raggiungere temperature di 1.400° C. L'attribuzione cronologica di questi forni è alla prima fase di occupazione Slava (V - VI secolo d.C.)⁷².

Altre strutture di rilievo nel panorama europeo dei bassi fuochi a camino sono quelle britanniche di Pickworth nel Lincolnshire, Aschwicken nel Norfolk e Withylam nel Kent, tutte riferibili all'età Romana⁷³. Esse constano di strutture in pietre e argilla cruda, localmente concotta, con una camera sovrastata da un camino tubolare e un'apertura



I resti del piccolo forno a camino con una delle camere del mantice a membrana della ferriera di Scarmagno (Torino), costruito accanto all'edificio che ospitava l'atelier. (II - I sec. a.C.). Accanto la grande lastra in gneiss del banco da lavoro con la grande coppella e i fori per l'infissione di perni di contrasto per piegature calibrate, la cui superficie venne usata da piano di frantumazione del minerale e da incudine.

per la manovra di scarico e un'altra per la tuyère. Tylecote che ha analizzato questi rinvenimenti riferisce un'altezza presunta del camino non superiore a 1,40m ma forse normalmente inferiore. Strutture analoghe, poco conservate in elevazione, sono molto numerose e lo stesso basso fuoco del castelliere della tarda età del Ferro di Bryn y Castell Hillfort nel Galles mostrato sopra (v. p. 129), potrebbe rientrare in questa tipologia⁷⁴. Ancora da segnalare una raccolta di reperti metallurgici sui siti gallo-romani della Montagna Nera nell'Aude (Pirenei), che ha fornito indicazioni precise sulla presenza di forni chiusi⁷⁵. Analoghi reperti sono noti lungo torrente Chiusella in Canavese.

Un forno a camino, di età merovingia o carolingia, assai ben conservato è presente

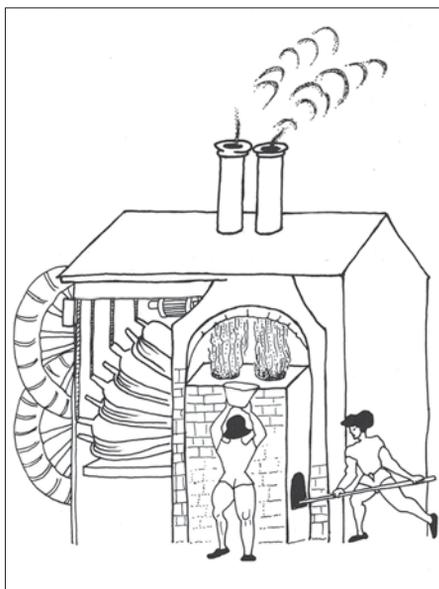
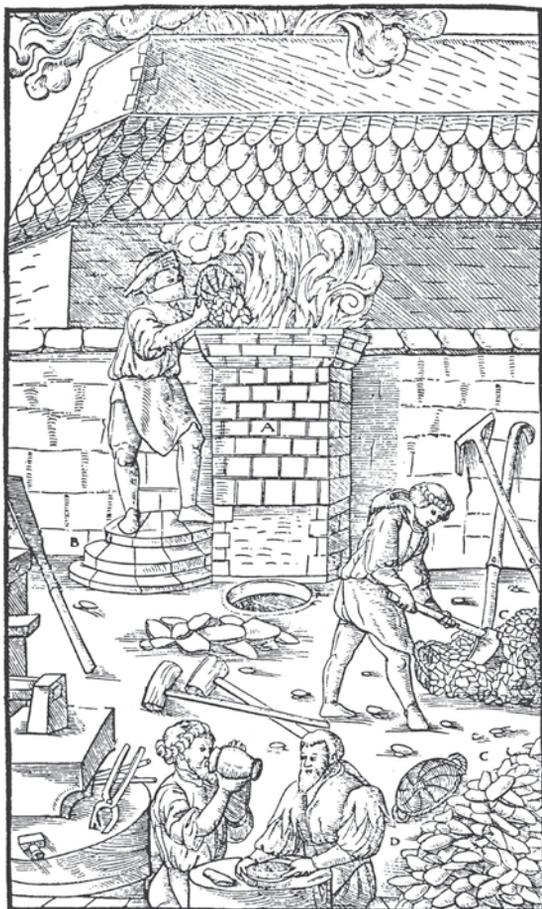
⁷² Plainer 1963, p. 181.

⁷³ Tylecote 1966, p. 90.

⁷⁴ Crew 1984, p. 91.

⁷⁵ Domergue 1982, p. 205.

anche a Ludres in Lorena⁷⁶. L'evidenza europea più tarda è stata studiata e pubblicata da Radomir Plainer. Si tratta di un basso fuoco a camino del XIII secolo⁷⁷ in un atelier scoperto a Radetice. Questa struttura dispone di un corpo cilindrico del diametro di poco superiore a 1 metro, con un'apertura di circa un quarto della circonferenza attraverso la quale si accedeva al focolare. Il camino, anch'esso cilindrico ha un diametro compreso tra 25 e 30 cm. La struttura risulta costruita direttamente sul suolo argilloso e consta di un piede di argilla concotta e di un'alzata in pietre accuratamente tagliate e



(Sopra) Coppia di forni a manica in funzione da un'illustrazione inglese del XV secolo.

(A lato) Forno a manica illustrato nel *De Re Metallica* in fase di funzionamento, con il maestro schermato dal bavaglio per difendersi dalle ventiche emissioni gassose, mostrato nell'atto di immettere minerale nel forno durante la marcia. A. Fornace; B. Scaglioni; C. Vena (minerale pretrattato) che un aiutante sta muovendo con una zappa; D. Cumulo di carbone.

connessa con argilla. A questa tipologia paiono attribuibili anche i forni di forma conica scoperti alla fine del secolo XIX a Koszegfalva e Eisenburg, attribuiti al X - XII secolo⁷⁸.

8.3 Dal forno a manica all'altoforno

La cesura tra il forno a camino e il forno a manica, con la successiva evoluzione di questo nell'altoforno, si colloca in un momento imprecisato del Medioevo, sebbene forni a camino con marcia analoga a quella dei forni a manica, che incidentalmente o

⁷⁶ Coudrot, Decker 1986, p. 184.

⁷⁷ Plainer 1963, p. 191.

⁷⁸ Heckenast 1968, p. 190.

volutamente producono piccole quantità di ghisa siano noti anche in precedenza ma questo fatto si limita a piccole quantità di una lega ferro carbonio colabile, presente nel processo diretto di riduzione, che i metallurgisti chiamano “ferraccia” e disprezzano per le pessime caratteristiche tecniche. Peraltro, la ghisa greggia (detta grigia) senza il processo di affinazione è praticamente inservibile se non per piccoli oggetti di fusione che non debbano essere sottoposti a sforzi.

L'evoluzione del forno a camino in quello a manica, con la marcia adeguata per la produzione della ghisa ha un senso soltanto quando in Europa la tecnologia metallurgica giunge a prevedere l'affinazione di questo primo prodotto, ma ciò richiede un lungo cammino che non viene compiuto se non con l'evoluzione tardo-medievale dei sistemi produttivi metallurgici.

Rispetto a questa struttura materiale gli storici della tecnologia e gli archeologi spesso non concordano sul tipo di marcia. Taluni identificano la manica esclusivamente nel forno che giunge alla fusione del minerale implicando il procedimento indiretto, mentre altri non distinguono chiaramente tra questo e il forno a camino. In questa sede identifichiamo come forno a manica esclusivamente quelle strutture che dispongono di una

struttura solida spesso a doppia muratura ma che non giungono alle temperature di fusione del ferro e di conseguenza implicano ancora il procedimento diretto tipico del basso fuoco. Ciononostante, certe tipologie di forni a manica piuttosto grandi e ben alimentati giungono alla produzione di piccole quantità di ghisa oltre al blumo agglutinato. È evidente che il forno a manica è l'anello di congiunzione evolutiva dei sistemi

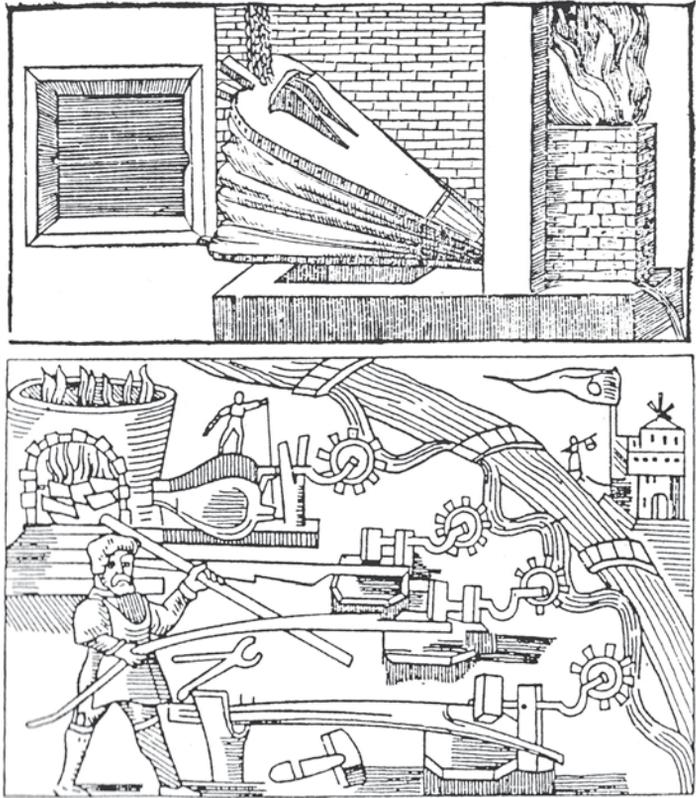


Illustrazione del forno a manica nel trattato De la Pirotechnia di Vannoccio Biringuccio edito nel 1540.

(Sotto) Il lavoro del ferro in una illustrazione del trattato di Olaus Magnus del 1555, dove si vede il grande forno a manica a pianta circolare, una ruota azionante il mantice per l'insufflazione dell'aria nel forno e tre ruote azionanti altrettanti magli a testa d'asino impiegati nella forgiatura di lunghe lastre.

a produzione diretta con quelli ben più potenti, in termini di volumi produttivi, tipici del procedimento indiretto, definiti altiforni.

Relativamente all'ambiente tedesco, una notizia del secolo XIII riferisce di un forno in Stiria, realizzato in muratura e sviluppato in altezza, definito *rennfeuer*⁷⁹. Nella stessa area, nel XIV secolo è documentato lo *stuckofen*, identificabile con quella struttura che nell'ambiente italiano viene definita "forno a manica"⁸⁰.

Nell'Europa continentale, il procedimento indiretto basato su forni a manica di co-

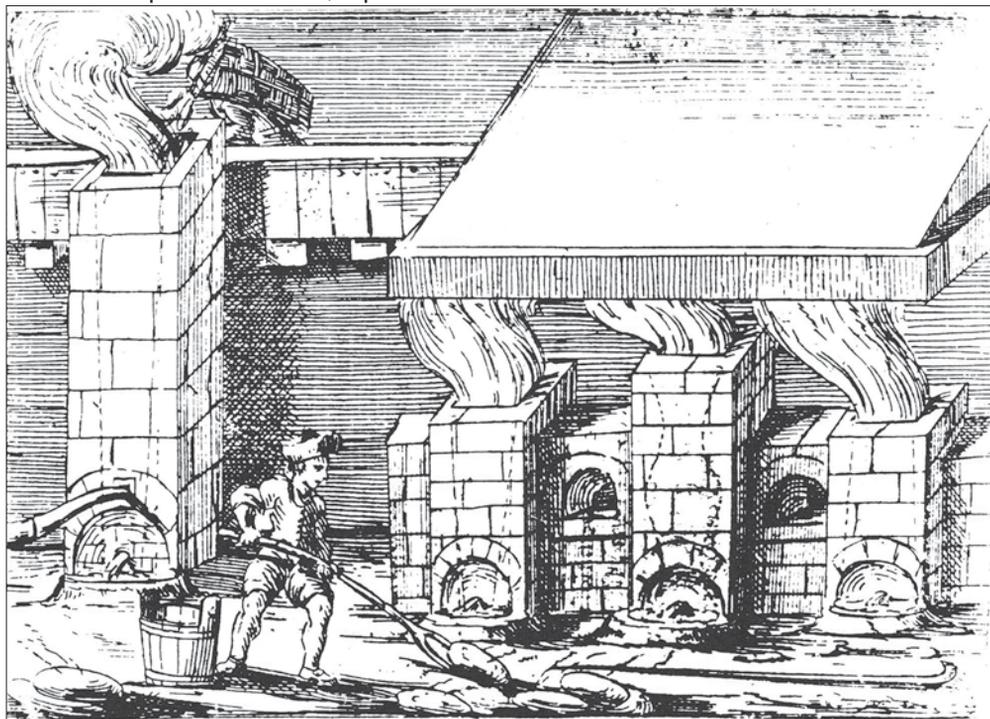


Illustrazione dalla *Pratica Minerale* con una batteria di forni a manica costruiti con diverse sagome interne e uno più alto riferibile al "canecchio" bresciano.

spicue dimensioni, pare largamente diffuso sin dal XV secolo. La vaga idea sui forni impiegati riporta a strutture in muratura, realizzati in materiali diversi, dalla pietra connessa con malta o argilla, al laterizio o ad entrambi i materiali; con altezze variabili oltre i 2 - 3 m e cavità interna a tino, di profilo quadrato, rastremata alla base. Le dimensioni di queste strutture sono state oggetto d'indagine, ma quelle medievali restano difficili da comprendere per la scarsità di testimonianze materiali, mentre nel caso dei sistemi cinque-secenteschi sono possibili valutazioni più fondate che ipotizzino altezze che giungono a 4 m, desunte soprattutto dalle immagini a corredo dei testi tecnici.

Il forno a manica, analogamente a quello a camino, prevede un sistema di ventilazione costituito da mantici di cuoio azionati forse manualmente⁸¹, ma più sovente,

⁷⁹ Braudel 1977, p. 286.

⁸⁰ Agricola 1563, p. 16v. Altre volte con lo stesso termine si indica l'altoforno.

⁸¹ Ivi, p. 359 e Biringuccio 1540, p. 110r.

soprattutto a partire dal basso Medioevo, mediante una ruota idraulica.

La temperatura più elevata che si raggiunge nel procedimento indiretto è dovuta in parte alla forma della camera, ma in misura maggiore alla ventilazione⁸². L'evoluzione del processo va dunque interpretato come una crescita tecnologica dell'intero sistema dove il ruolo delle macchine soffianti è fondamentale.

La carica, eseguita con la stessa tecnica praticata nei bassi fuochi, disponendo strati alterni di combustibile (carbone di legna) e minerale di ferro, oltre a porzioni di

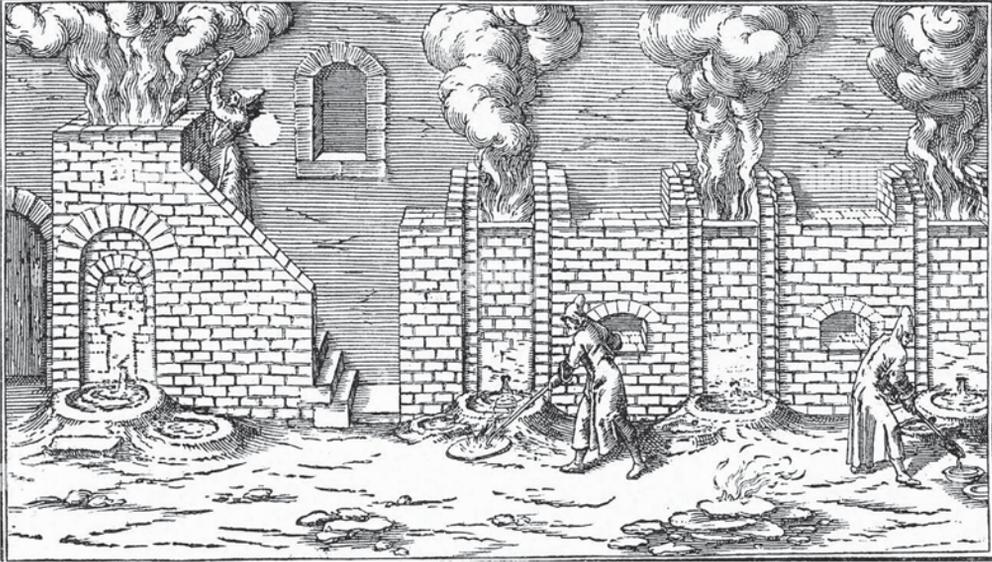


Illustrazione del lavoro in un centro produttivo siderurgico analoga a quella contenuta nel trattato del Della Fratta con un forno a manica più alto che anche in questo caso potrebbe riferirsi al "cannecchio" o al forno Vallone.

scorificante, costituito da frammenti di roccia silicea, avviene attraverso l'apertura situata in alto. La lega che si ottiene a fine processo (ferraccia) viene recuperata in basso attraverso un'apposita apertura sigillata all'avvio con un tappo di argilla.

Questa struttura produttiva, a differenza delle altre descritte in precedenza, prevede l'inserimento in un complesso articolato, con dei vincoli di localizzazione precisi. I dati archeologici suggeriscono la collocazione delle strutture basate sul sistema tecnologico del basso fuoco o del forno a camino, prevalentemente nelle foreste prossime ai giacimenti minerari, ove abbonda il combustibile e non si richiede un grande trasferimento del minerale. Nel caso del forno a manica e più ancora dell'altoforno, il vincolo dell'azionamento idraulico dei mantici per la produzione di una ventilazione sufficiente ad alimentare la marcia del forno e la presenza di magli idraulici, costringe la localizzazione della struttura lungo i corsi d'acqua ove si possono ottenere derivazioni e salti adeguati all'azionamento delle ruote motrici⁸³.

Come già osservato, a partire dal XV secolo l'ambiente centro-alpino elabora una versione di forno a manica molto alto, capace di produzioni elevate che i metallurgisti

⁸² La ventilazione della camera di riduzione è direttamente proporzionale alle capacità termotecniche del sistema.

⁸³ Cima 1991, p. 206.

locali chiamano “canecchio”. Da quel momento il sistema incomincia a diffondersi lungo l’arco alpino e nell’ambiente peninsulare⁸⁴. La struttura materiale è quella di un forno strutturato in muratura, di dimensioni considerevoli, fino a cinque o sei metri di altezza con il ventre a sezione quadrangolare, che richiede potenti mezzi di ventilazione. Nel complesso, il sistema è fortemente innovativo. Esso scaturisce da un ambiente tecnico - metallurgico molto avanzato, in primo luogo grazie alla potenza commerciale, politica e militare del Ducato di Milano con la sua importante industria spadaria e delle



Resti del forno a manica di XIV secolo a Kropa in Slovenia. Questo sito contiene una delle più antiche testimonianze materiali di questa tecnologia ancora parzialmente in elevazione. (Fotografia J. Jaritz).

armi da fuoco⁸⁵. Ma le fortune di questo sistema, già in grado di esportare prodotti in ferro e acciaio in tutta l’Europa e nei paesi del Mediterraneo, sembrano accrescersi con la conquista veneta del 1428 che apre il settore agli sbocchi commerciali su scala continentale. L’accesso ai grandi mercati mediterranei accelera l’evoluzione tecnologica del sistema come risposta alla grande crescita della domanda di ferro da parte dei mercati. Il sistema tecnologico delle alpi bresciano-bergamasche, con ogni evidenza, giunge precocemente alla messa a punto del canecchio, nella cui definizione strutturale potrebbero non essere estranei apporti orientali provenienti dalle lontane rotte della seta con le quali la Repubblica di Venezia aveva continui contatti per via delle costanti presenze nei porti mediorientali.

Analisi dei documenti

Relativamente al forno a manica l’archeologia non è ricca di dati. Ciò pare spiegarsi con la scomparsa delle testimonianze materiali data la sovrapposizione di nuovi impianti

⁸⁴ Cima 1991, p. 155.

⁸⁵ Benoit, Cailleaux 1988, p. 135.

ti sui siti di primo insediamento, poiché negli ultimi secoli si registra un continuo rifacimento e ammodernamento delle strutture produttive che insistono sullo stesso apparato idraulico. Di conseguenza molti impianti antichi vengono riutilizzati e la lettura delle stratigrafie sugli edifici spesso rimanda a numerose sovrapposizioni che talora giungono fino all'avvento dell'energia elettrica. Per ottenere le informazioni di dettaglio occorre rifarsi ancora una volta ai trattati tecnici dei secoli XVI e XVII e ai documenti d'archivio. Gli unici dati archeologici di rilievo a questo proposito sono rappresentati dalla struttura

di forno a manica scoperto a Kropa in Jugoslavia e da quelle studiate in Canavese (Piemonte), a Ceresole Reale con uno scavo in estensione che ha coinvolto anche il vicino impianto di magli a testa d'asino⁸⁶ e quella di Strambinello di cui si è eseguito il rilievo. In aggiunta va considerato il forno di Jernkontoret in Svezia⁸⁷. Quest'ultima evidenza appartiene a un grande complesso produttivo articolato, comprendente anche i resti di almeno due fuochi di affineria discretamente conservati, il magazzino del carbone e la fornace di arrostitimento. Le analisi al Carbonio 14 realizzate su resti di carbone raccolti in associazione con le strutture produttive hanno consentito di collo-



Resti del grande forno a manica a sezione quadrangolare tardo-medievale scavato a Ceresole Reale in Canavese (Torino) la cui altezza in esercizio superava 3,5 m.

care le attività del complesso tra il 1150 e il 1425, con due periodi nei quali l'attività è più probabile (1150 - 1200 e 1375 - 1425). Il forno attribuibile alla seconda fase, è costituito da un corpo di fabbrica a base quadrangolare, in pietra, connessa con sedimento argilloso, localmente concotto. Il decadimento delle parti alte e una probabile spogliazione non consentono di leggere con chiarezza l'intera forma del manufatto. Ciononostante è stato possibile stabilire che si tratta di un sistema a tino, con profilo ancora quadran-

⁸⁶ Cima 2008, p. 124.

⁸⁷ Bjorkenstam, Fornander 1985, p. 184.

golare, molto alterato dalle fasi d'uso che lo hanno quasi completamente arrotondato. L'accesso al crogiolo è garantito da un'apertura con pronunciata strombatura dell'imbotto che consentiva agli operai di manovrare adeguatamente intorno all'orifizio del crogiolo. Al lato destro, rispetto alla fronte, una seconda apertura di dimensioni inferiori consentiva di alloggiare le fistole dei mantici destinati all'alimentazione della combustione. La presenza di un canale in posizione adiacente al forno conferma la presenza dei sistemi meccanizzati per l'azionamento delle ruote idrauliche dei mantici, di cui



I resti del grande forno a manica medievale di Lappytan in Svezia, considerato il più antico altoforno che tra il 1150 e il 1350 risulta già in grado di produrre ferraccia (ghisa grezza) in quantità considerevoli.

alla base. Non è agevole stabilire l'altezza complessiva del primo per il decadimento delle parti alte ma quelli canavesani, costruiti entrambi contro un terrapieno che li ha protetti, rimandano ad altezze che si aggirano intorno a 3,5m. La tecnica costruttiva rimanda alla doppia muratura, quanto meno per il lato contro terra e quelli laterali.

La prima descrizione dettagliata di un forno a manica alto, simile a quelli bresciani che si diffondono nell'area alpina a partire dal XV secolo, è di Filarete (1460), ed è ri-

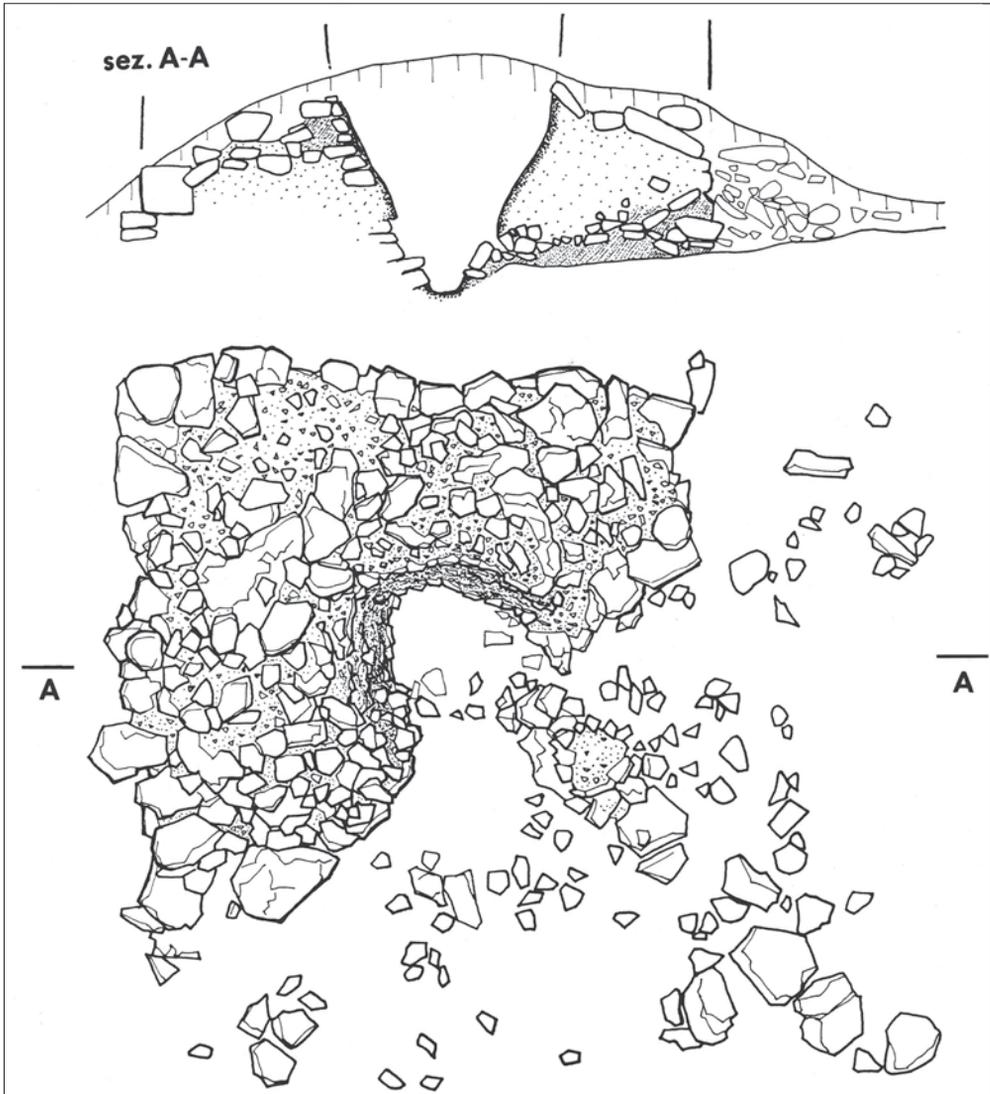
lo scavo non ha fornito ulteriori indicazioni.

Questo singolare complesso produttivo, ove sono leggibili tutte le strutture fondamentali, consente di comprendere con una certa precisione l'organizzazione spaziale. Sebbene l'impianto abbia dimensioni considerevoli, nessuno degli elementi indagati risulta contenuto in un edificio. L'intero sistema si presenta come un'unica area aperta in cui la posizione di ogni singolo elemento è funzionale alla movimentazione delle materie concernenti il processo di riduzione del minerale in metallo, oltre al citato apporto di energia idraulica.

Il forno a manica di Kropa e i due del Canavese hanno caratteristiche simili, anche se quelli italiani presentano un ventre quadrangolare ad andamento regolare, mentre quello sloveno è maggiormente rastremato

ferita al forno di Ferriere in Val di Nure nel Piacentino. Si tratta di una struttura alta otto braccia a cui risultano accostati due grandi mantici mossi da una ruota “a bottacci”⁸⁸.

Il trattato di Olaus Magnus (1490-1557) “*Historia de gentibus septentrionalibus*”⁸⁹ del 1555 riporta un’illustrazione contenente un forno, piuttosto alto e largo, con un’apertura anteriore insolitamente grande e l’alimentazione dell’aria garantita da un grande mantice a palmenti azionato da una ruota idraulica (v. figura a p. 147), oltre a tre magli a testa d’asino anch’essi azionati da ruote idrauliche. Olaus è l’arcivescovo cattolico del regno



Planimetria e sezione del grande forno a manica di Lappyttan del complesso produttivo medievale di Jerncontoret in Svezia. (Da Björkenstam ridisegnato).

⁸⁸ Baraldi 1991, p. 131.

⁸⁹ Maddin 1985, p. 184. Nei secoli XVI e XVII sono piuttosto numerose le illustrazioni di mantici azionati idraulicamente, ma quelli illustrati da Olaus hanno il pregio di associare la macchina soffiante a un forno.

di Svezia e prima di questa nomina, a partire dal 1526 vive in Polonia con suo fratello anch'esso prelado ed ha modo di conoscere bene l'ambiente del nord Europa, tutt'altro che arretrato, soprattutto per quanto riguarda gli aspetti della tecnologia metallurgica.

Biringuccio e Agricola, pur fornendo ottime illustrazioni, non descrivono con precisione questo processo di riduzione dei minerali di ferro nel forno a manica, mentre i tecnici del secolo successivo riportano informazioni molto precise sia sulle strutture materiali, sia sui processi. Le illustrazioni che gli scrittori tecnici cinquecenteschi pro-



I resti del canneccio (le grand fourneau) impiantato da Bernardo Mutta in Valmeriana (Valle d'Aosta) nel 1678.

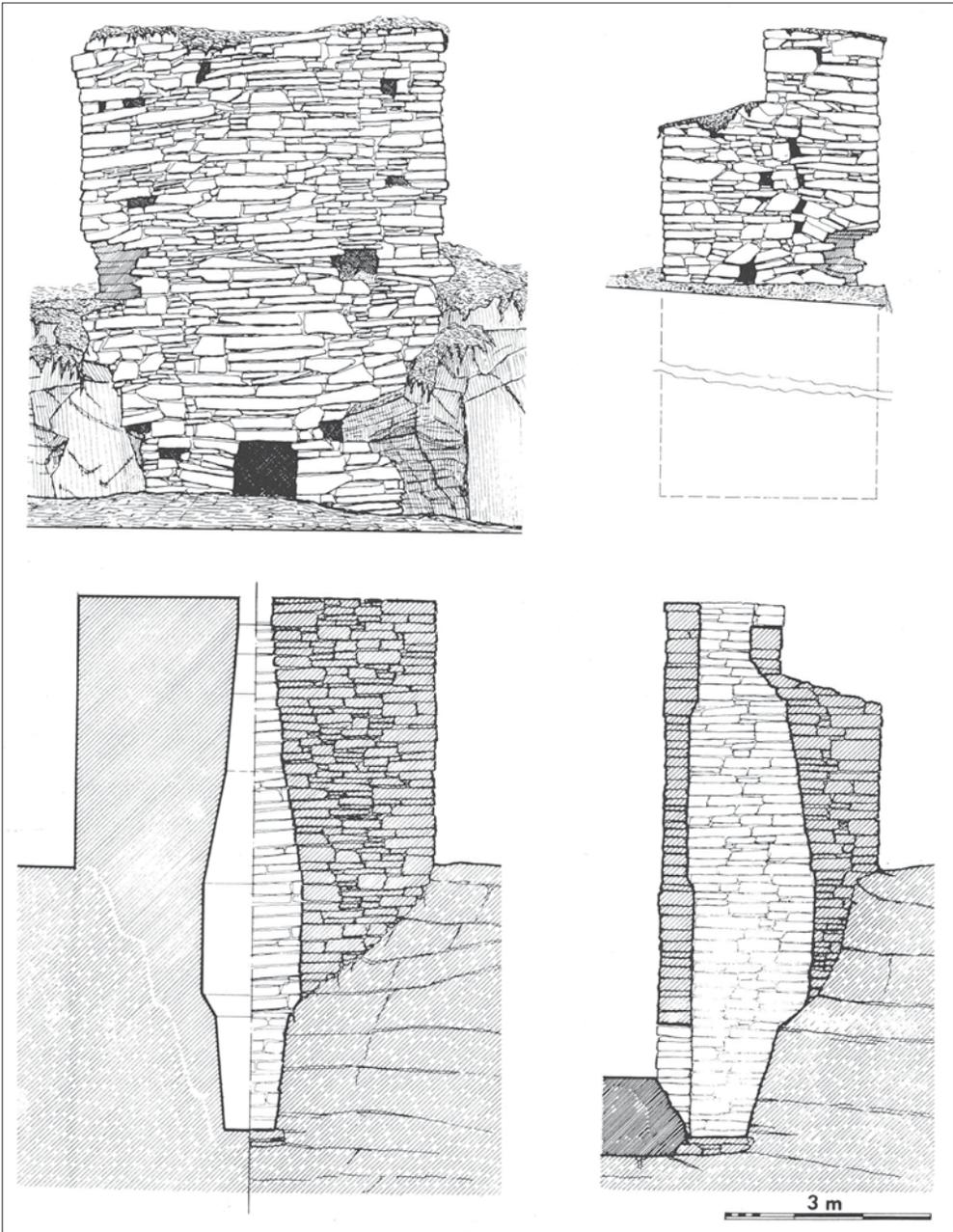
pongono giungono a definire piuttosto chiaramente le dimensioni. Il disegno della Pirotechnia coincide anche nei dettagli con i forni a manica studiati sul terreno. La struttura è quella di un prisma a base quadrata costruito in pietre refrattarie, con la cavità a tino anch'essa quadrata, rastremata alla base. L'altezza complessiva è di 6-8 braccia (da 3,48 a 4,64 m), mentre la tuyère del mantice è posta a due braccia e mezzo dal fondo (circa 1,45 m). Il forno illustrato dall'Agricola non reca misure⁹⁰. Ludwig Beck le stima⁹¹ l'altezza in 2,4 m e la cavità in 0,4 x 0,5 m ma paiono eccessivamente ridotte.

Una struttura molto simile a quella di Olaus Magnus si trova nella Metallotheca di Michele Mercanti (1541-1593). Questi, intorno alle metà degli anni '70 del XVI secolo, riceve l'incarico dal papa Gregorio XIII di istituire un museo mineralogico in Vaticano e di scrivere, in un'opera che fosse la risposta italiana al "De Re metallica" di Giorgio Agricola. La sua "Metallotheca"⁹² ha una storia singolare perché alla morte dell'autore il

⁹⁰ Biringuccio 1540, p. 17r.

⁹¹ Beck 1895, p. 158 e Krulis Randa, 1967, p. 52.

⁹² Mercanti 1719, p. 38r.



Prospetti e sezioni dell'impianto di forno a "cannecchio" a Pontey (Valmeriana) - Valle d'Aosta, attribuibile agli anni 1670, documentato con una fotografia nella p. a fronte. (Da Nicco 1987).

manoscritto andò perduto e fu ritrovato all'inizio del XVIII secolo e pubblicato nel 1719.

Un notevole disegno inglese cinquecentesco, riportato da Bertrand Gille, mostra un impianto di due forni a manica alimentati da due coppie di mantici azionati da ruote idrauliche. Il confronto con le dimensioni degli uomini dell'illustrazione)⁹³ riporta la strut-

⁹³ Gille 1972, p. 235.

tura ad un'altezza di oltre 3 m (v. fig. p. 146), coerentemente con le misure fornite dal Biringuccio e Filarete.

Oltre un secolo più tardi, Marco Antonio Della Fratta Montalbano che conosce bene l'ambiente polacco, tedesco, ungherese, cecoslovacco e italiano, descrive ancora i forni a manica, in parte analoghi a quelli riportati dai tecnici cinquecenteschi, ma più alti. «...*Per ordinario lunghe piedi venti...*». Inoltre mostra i profili interni articolati a seconda della qualità del minerale da ridurre⁹⁴.



Olio su tavola del fiammingo Herri met de Bles, noto anche come Il Civetta (c. 1490 – dopo 1566). Il dipinto, datato tra il 1525 e il 1550, è conservato alla Galleria Nazionale di Praga e mostra l'ambiente di una miniera (in basso a destra), l'altoforno con la ruota per l'azionamento dei mantici al centro e la ferriera a sinistra in un ampio paesaggio vallivo ove si staglia un abitato turrato.

Krulis-Randa riporta il disegno di un forno del 1613 proveniente dall'archivio di un castello del Lichtenstein⁹⁵. Questo, ha la forma di un tronco di cono con la base maggiore in basso in corrispondenza del crogiolo e il raccordo del mantice è posto a circa un terzo dalla base. Tale impostazione appare coerente con la descrizione di un forno⁹⁶ boemo fornita da Emmanuel Swedemborg nell'«Opera Philosophica et Mineralia», ove

⁹⁴ Della Fratta Montalbano 1678, p. 84. Non è chiaro a quale tipo di misura si riferisca Giorgio Agricola la comparazione delle proporzioni nel disegno non rimandano a strutture così alte. È viceversa molto preciso il disegno dei forni che propone il Della Fratta nel suo trattato, ove per comparazione si distingue il cannechio dal forno a manica.

⁹⁵ Krulis Randa 1967, p. 253.

⁹⁶ Ivi.

la “piramide tronca” non è rovesciata come nel forno bresciano, ma la base maggiore coincide con l’area del crogiolo.

Date le dimensioni che le “maniche” assumono nel corso del XVII secolo⁹⁷, possiamo ormai parlare a tutti gli effetti di altoforno. La ricostruzione precisa delle strutture materiali non può essere attuata sulla semplice base dei testi tecnici cinquecenteschi, poiché spesso forniscono descrizioni sommarie, nonostante il quadro piuttosto preciso che emerge dalla comparazione delle singole descrizioni con disegni, schizzi e dipinti.



Dipinto del fiammingo Lucas Van Valkenborch (c. 1530 - 1597). L’opera, realizzata intorno al 1580, mostra un ambiente minerario - metallurgico lungo il corso della Mosa. A destra, accanto all’imbocco della miniera, è raffigurato il forno di arrostimento del minerale; al centro contro la parete rocciosa il magazzino e in basso a sinistra l’altoforno durante la fase di funzionamento. Accanto, nella spianata sono raffigurati i pani di ghisa in forma allungata e il meccanismo di azionamento del sistema di ventilazione composto a due mantici in moto alternativo mossi dalla ruota idraulica e contrastati da una lunga molla lignea vincolata a un grande masso.

La descrizione fornita dall’Agricola è scarna⁹⁸ e soltanto la presenza dell’illustrazione consente di comprendere: «.. la fornace (è) simile a la prima, ma molto più ampia et alta, a ciò possa tener vena assai, et assai carboni, perché in parte s’empie di pezzuoli di vena non maggiori di una noce, et in parte di carboni, le quali cose i cocitori salendo per alcuni scaglioni accomodati a un de’ lati de la fornace, gli gettano in quella».

Più circostanziata, ma complessivamente concordante con la descrizione fornita dall’Agricola è quella riportata nel De la Pirotechnia, accompagnata anch’essa da un buon disegno tecnico commentato in precedenza. «...Un gran paro di mantici tutti ac-

⁹⁷ Della Fratta Montalbano 1678, p. 84.

⁹⁸ Agricola 1563, p. 359.

*costati al muro de la manicha a guisa d'un gran par d'ale che per altezza commune-
mente son da le sei alle otto braccia, li quali mossi da una salda ruota de acqua...Et
cosi col lo potente et grandissimo fiato messo in tal manicha quasi al fondo a 2 braccia
e mezzo per una canna, impiandola di carbone si fa fondere a tal maniera ...»⁹⁹.*

Il Della Fratta illustra dettagliatamente un forno a manica di tipo bresciano che definisce "cannecchio"¹⁰⁰. Questo è più alto del normale (circa 7 m), con una cavità quadrata che si va restringendo alla base, e il "portavento" è posto nella parte ante-



Il cannecchio di Malonno in Valcamonica (Brescia), contenuto tra due robusti piloni costruiti per contenere il forno contrastando i movimenti indotti dalle deformazioni provocate dalle alte temperature. Si tratta di uno dei più antichi altiforni antichi dell'ambiente italiano ancora eretti. Il primo impianto risale al XVI secolo ed è stato costruito con grandi conci lapidei ben connessi e inchiodati mediante robuste tirantature in ferro. La struttura ha vissuto diverse fasi produttive rimanendo in funzione per circa due secoli.

dae, in aliis vero quadratae, diameter partis superioris est 3 pedum circiter circa partem inferiorum sunt ampliores, praecipus figurae quadratae, quae speciem quondam

riore sopra l'apertura di scarico. Egli sottolinea come: «*la stessa manica o cannecchio (per dirlo alla bresciana) si fa d'ordinario alto 12 braccia (oltre 7 m) compartendolo così che la parte superiore sia larga un braccio e mezzo (circa 90 cm) per quadrato nel principio, e discendendo si restringa a poco a poco, fino sul fondo del terreno, dove resta quadripartita ugualmente alla misura di mezzo braccio (30 cm) in circa ... Alla parte anteriore della manica devono essere collocati due buonissimi e grandissimi mantici, ovvero una botte, che soffi gagliardamente¹⁰¹...*» (queste ultime misure riguardano la cavità).

Nel 1734 Emanuel Swedemborg, assessore alle miniere nel Regno di Svezia, descrive un altoforno che attribuisce alla Boemia, singolarmente analogo a quelli descritti dal Della Fratta. «*Furnaces sunt altitudine 22 ad 24 pedum, cavitates allarum sunt quibusdam in locis rotun-*

⁹⁹ Biringuccio 1540, p. 16v.

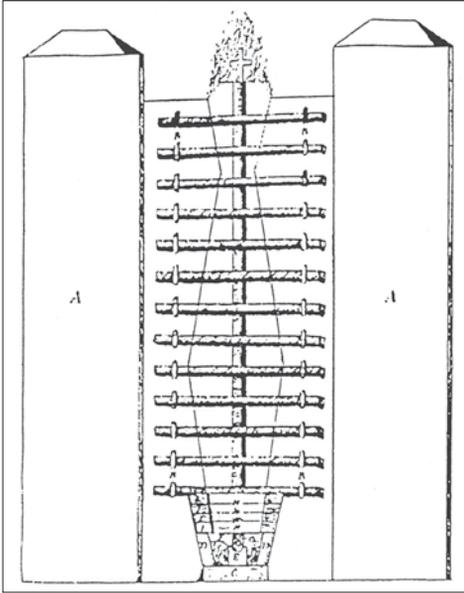
¹⁰⁰ Della Fratta Montalbano 1678, p. 84.

¹⁰¹ Ivi, p. 141. Qui l'autore cita la tromba idroeolica ma normalmente l'alimentazione dei grandi forni è a mantici.

pyramidis truncate referunt». Si tratta indubbiamente del canneccio o di strutture simili a quel punto largamente diffuse in tutta l'Europa¹⁰².

Altre fonti di un certo rilievo a proposito dei forni a manica e degli altiforni tardo-medievali e cinque-secenteschi sono da ricercare nelle corografie delle zone minerario-metallurgiche solitamente conservate negli archivi.

Molto interessanti per la ricostruzione degli ambienti produttivi sono alcuni dipinti di pittori rinascimentali. È già stato presentato l'altoforno del quadro di Jan Bruegel il



Disegno schematico di un impianto di canneccio toscano della metà del Settecento (sezione). Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze (manoscritti palatini, serie Targioni). La figura è corredata da una ricca didascalia tecnica. A. Alzata costituita dalle pile, B. Parete con 13 catene di ferro; C. Pietra nominata il fondo, D. Pietra nominata scorze, E. Pietra nominata il fettone, F. Pietra nominata caldadore, G. Caldadore della parete detta arca; H. n. 4 pietre nominate ceppo. (A lato) L'altoforno di Nordavoix a Rouceux sulla Mosa (Francia) da una tavola del 1584.



Vecchio datato 1602, dove si vede una struttura quadrata di circa 7 m con una sommaria tettoia a protezione dell'apertura di scarico e una ruota idraulica destinata all'azionamento dei mantici. Alle spalle del forno si indovinano delle strutture di accesso alla bocca di carico (v. fig. a p. 60). Ancora più dettagliato e corografico è il quadro di Lucas Van Valckenborch datato intorno al 1580 conservato al Kunsthistorisches Museum di Vienna dove, oltre al forno simile a quello di Jan Bruegel, vi sono tettoie ricoperte di paglia che lo circondano, una grande condotta

per l'alimentazione della ruota dei mantici, una fornace di arrostitimento e un magazzino (v. p. 157). Un'altra notevole raffigurazione di altoforno è contenuta nel quadro "La metallurgia di Herri met de Bles, conservato alla Galleria Nazionale di Praga, dipinto tra il 1525 e il 1550 (v. figura p. 156). Di particolare rilievo anche l'acquarello¹⁰³ di Giovan Francesco Cantagallina del 1618 che mostra gli "edifizi" con canneccio di Follonica, nel principato di Piombino (v. p. 71).

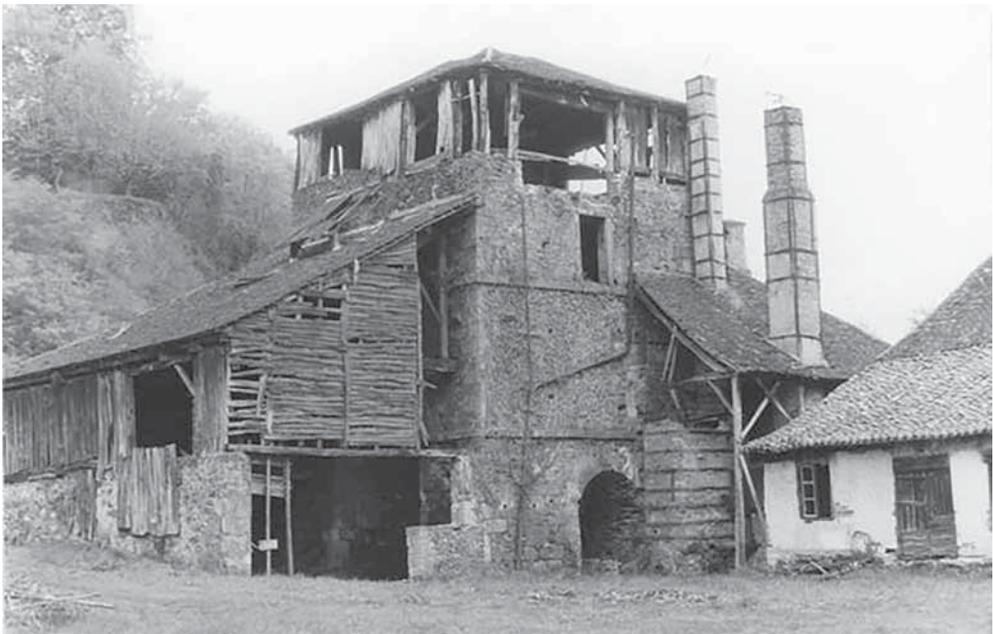
Particolarmente importante è il forno di Malonno in Valcamonica (Lombardia) di

¹⁰² Swedemborg 1734, p. 245.

¹⁰³ Archivio di Stato di Firenze, Miscellanea Medicea, Sez. 546 C, 3.

cui si ha notizia sin dal XVI secolo. Si tratta dell'unico canneccio conservato nelle strutture in elevato, anche se vanno considerate le possibili trasformazioni del tino. La struttura è composta da enormi lastre litiche inchiodate con chiavi in ferro (v. p. 158).

Da segnalare anche quattro tavole di disegni del 1497¹⁰⁴ attribuite a Jacopo de Giarda con i disegni e la descrizione degli strumenti minuti in uso ai ferrieri operanti nel canneccio di Fornovolasco in provincia di Lucca (Toscana).



L'altoforno a carbone di legna di Savignac-Lédrier in Dordogna (Francia) come si presentava nel 1982 prima degli interventi di restauro. (Da J. Lobjoit; Fonds ASFSL).

8.4 Dall'altoforno a carbone di legna al carbon fossile

Negli ultimi decenni del XVIII secolo, con la definitiva affermazione della siderurgia come industria strategica nella nascente Europa industriale, i sistemi di riduzione dei minerali di ferro divengono oggetto di una consistente ricerca tecnologica spesso stimolata dalle amministrazioni e dagli arsenali dei singoli stati.

Con la seconda metà del Settecento la struttura materiale dell'altoforno a carbone di legna è completamente stabilizzata, mentre nell'ultimo decennio già si affacciano le prime esperienze di marcia con l'impiego del carbon fossile opportunamente trattato: il coke¹⁰⁵.

I testi tecnici e le descrizioni, che nei secoli precedenti sono molto rari e spesso compilati da letterati con scarsa competenza tecnica, in questa fase divengono più

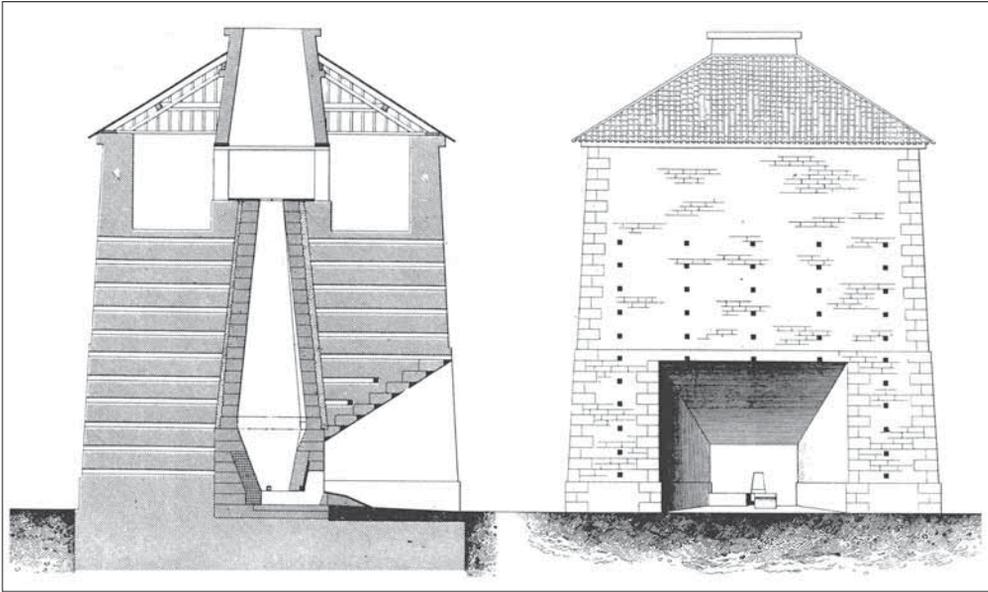
¹⁰⁴ Baraldi, Calegari 1991, p. 137. I documenti sono conservati all'Archivio di Stato di Modena.

¹⁰⁵ Uno dei primi esperimenti di conduzione dell'altoforno a carbon fossile noto è del 1709 a Coalbrookdale in Gran Bretagna a opera di Abram Darby ma trascorreranno molti decenni prima che divenga pratica corrente, praticamente giungendo fino alla fine del secolo. Mondini 1977, p. 97.

numerosi e circostanziati, pertanto si può agevolmente ricostruire la struttura materiale dei diversi sistemi impiegati.

L'altoforno consiste in un grande corpo di fabbrica di forma parallelepipedica, solitamente accostato a un dislivello naturale del terreno, al fine di facilitarne l'accesso alle parti alte e al contempo ottenere il necessario salto d'acqua per muovere le ruote idrauliche che azionano i meccanismi ad esso connessi.

Nelle moderne costruzioni di forni all'inglese o alla norvegese, risulta generalmente



Prospetto frontale e sezione dell'altoforno a carbone di legna di Chatillon sur Seine (Côte d'Or - Francia), dal trattato di W. De Saint Ange.

acquisita la tecnica della doppia muratura, costituita da un grande edificio a forma di tozza torre, costruito in solida pietra connessa con malta e dotato di un'inchiodatura a tiranti di ferro, o più raramente di legno. La parte interna contiene una seconda muratura in laterizio che costituisce il corpo del forno entro il quale avviene il processo di riduzione. Al piede della grande struttura si trovano due o tre portali, uno per ogni lato libero, con imbotto fortemente strombato, che consentono di raggiungere la muratura interna all'altezza del crogiolo. Entro fori opportunamente disposti, vengono alloggiare le condotte della ventilazione forzata collegate ai mantici oppure alle trombe idroeoliche, mentre un'apertura è riservata all'accesso al crogiolo per le operazioni di estrazione della ghisa e delle scorie.

L'impianto di altoforno comprende grandi magazzini nei quali vengono riposte le scorte di minerale, di combustibile, solitamente collocati sulla sommità della scarpata a ridosso della bocca del forno. Tettoie sui lati liberi sono spesso appoggiate al corpo principale della struttura al fine di proteggere dalle intemperie i portali di accesso al crogiolo e consentire agli addetti di operare agevolmente anche in caso di maltempo,

8. La riduzione del minerale in metallo

offrendo riparo ai meccanismi delicati come quelli dei mantici o dei magli. Le macchine soffianti (mantici idraulici o trombe) completano la struttura di cui ordinariamente è dotato un altoforno a carbone di legna. Nello stesso impianto o nelle immediate vicinanze d'ordinario si trova una batteria di magli e un fuoco d'affineria¹⁰⁶. Con la prima si eseguono diverse opere che vanno dalla fucinatura degli attrezzi per i fonditori, alla frantumazione delle scorie da riciclare o quella dei pani di ghisa greggia da affinare. Nel secondo, mediante rifusione, si produce ferro o acciaio che a sua volta viene "tirato" in



Resti dell'altoforno settecentesco a carbone di legna di Meugliano (Piemonte). Le strutture sono conservate con i resti delle tettoie antistanti, il piano inclinato di accesso alla bocca e i retrostanti magazzini delle materie prime.

barre o piastre con accurata battitura al maglio.

La definizione della tecnologia dell'altoforno, almeno per quanto attiene alla forma e alle dimensioni, si verifica al raggiungimento della misura in altezza di 20 o più piedi (oltre 6 m), che rappresenta la dimensione ottimale. Questa dimensione ricorre, dal trattato del Della Fratta a quello dello Swedemborg, del de Buffon, del Brocchi e dell'Hassenfratz, fino al particolareggiato manuale di metallurgia del De Saint Ange.

Il processo di riduzione dei minerali all'altoforno richiede una grande quantità di carbone di legna di buona qualità e viene avviato con la carica dall'alto, a strati alternati, di combustibile e minerale, con qualche strato di scorificante contenente rocce e scorie sminuzzate, secondo una precisa modalità, che talora implica l'uso del carbone in pezzature differenti. Completata la carica, si procede all'avvio della combustione dal basso, attraverso la bocca di scarico, interessando il primo strato di carbone. Succes-

¹⁰⁶ Questa organizzazione è ben documentata in molti rilievi degli impianti di età napoleonica disponibili negli archivi pubblici.

sivamente l'orifizio viene chiuso con argilla e l'alimentazione del processo è affidata alle macchine soffianti (mantici azionati da ruote idrauliche o trombe idroeoliche), che immettono dal basso aria in pressione. Dopo diverse ore, quando la combustione si estende all'intera massa di combustibile, all'interno del ventre si stabilisce un ambiente ad alta temperatura, fortemente riducente per via della relativa carenza di ossigeno consumato dagli strati bassi di carbone in fase di combustione. A quel punto avviene il processo di ossidoriduzione liberando metallo allo stato liquido che lentamente cola alla



Comprensorio produttivo siderurgico incentrato sull'altoforno a carbone di legna di Durban (Scozia Meridionale), con i resti delle strutture antistanti e sulla destra arretrato il grande magazzino delle materie prime.

base del crogiolo formando una lega con il carbonio presente in abbondanza all'interno del ventre, con percentuali variabili tra 3 e 5% a seconda del tipo di conduzione del procedimento e della sagoma del ventre del forno. Questa lega, definita dai metallurgisti "ferraccia", tecnicamente è una ghisa greggia, suscettibile di ulteriore affinazione per produrre ferro o acciaio. Quando il responsabile della conduzione del processo stima la presenza di un volume adeguato di metallo liquido nel crogiolo, la ghisa viene estratta rompendo il tappo di argilla che chiude l'orifizio facendola colare su un letto di terra da fonderia fine mista a polvere di carbone, con canalette opportunamente predisposte che attribuiscono al metallo solidificato la forma di grandi pani allungati facilmente maneggiabili per le successive lavorazioni all'affineria. L'abilità del maestro consiste nella conduzione del processo della durata di 20 - 30 ore o più (a seconda delle dimensioni del forno), per la prima colata, alla quale - con il forno avviato - la carica si può rinnovare producendo successive colate a intervalli regolari per lungo tempo, secondo cicli

produttivi che durano diversi mesi, con colate a cadenze prefissate.

Il passo tecnologico tra Sette e Ottocento conduce all'evoluzione dell'Altoforno per l'uso del carbon fossile (coke) in luogo di quello di legna¹⁰⁷, oltre a importanti ottimizzazioni energetiche con l'introduzione dei convertitori di calore per il pre-riscaldamento dell'aria da immettere nella camera di combustione. Parallelamente migliorano i macchinari e le apparecchiature connesse alla cernita, al trattamento e al trasferimento dei materiali oltre che all'azionamento delle macchine soffianti. Tuttavia, la geometria inter-

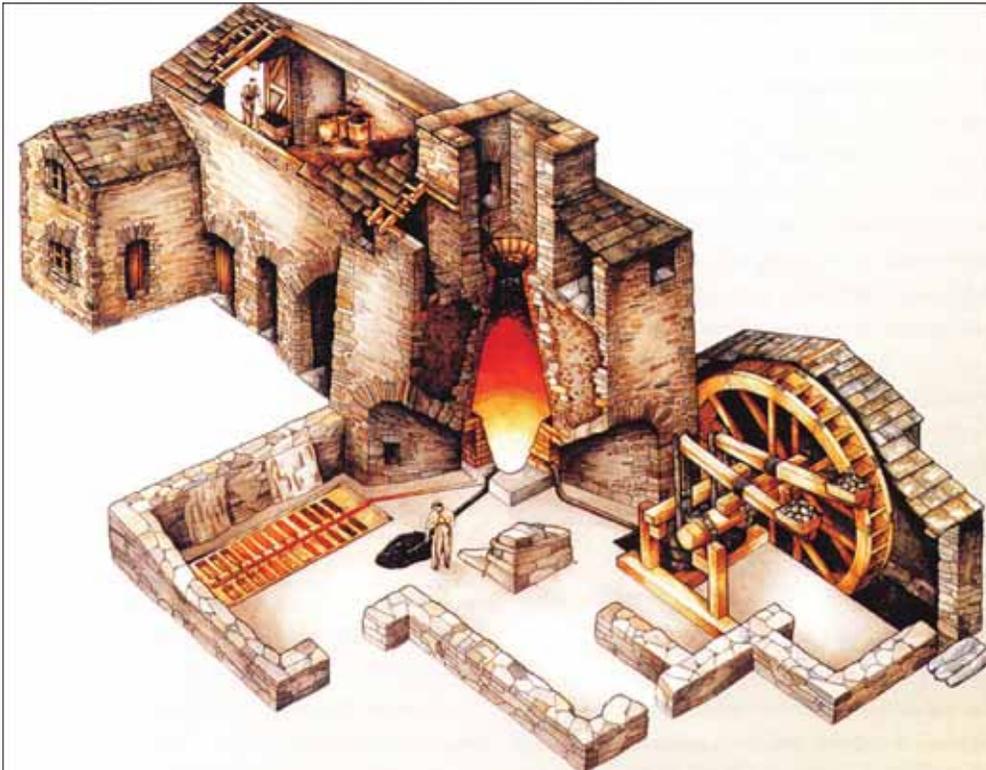


Illustrazione dell'altoforno a carbone di legna di Duddon (Cumbria - UK) impiantato nel 1736, mostrato durante il funzionamento. Il sistema è ancora alimentato con aria insufflata da mantici. (Da Bayley et al. 2008).

na del ventre, intesa come regolo del processo di riduzione appare consolidata, nelle soluzioni più avanzate, sin dagli ultimi decenni del XVIII secolo e prevede sezioni circolari e diametri variabili con il crogiolo cilindrico e la parte superiore a forma di bottiglia.

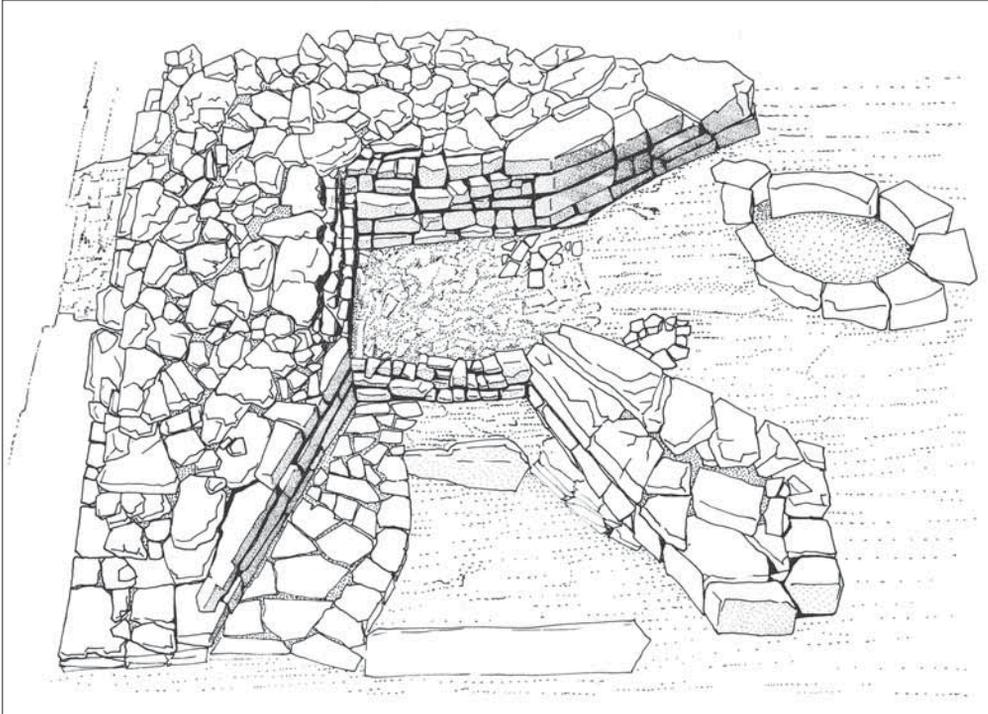
Analisi dei documenti

Le fonti archeologiche a proposito di questa struttura materiale sono molto abbondanti, ma la loro analisi dettagliata non è essenziale per la ricostruzione dei sistemi tecnologici data la grande disponibilità di fonti scritte e di un'eccellente iconografia. Di conseguenza ci limiteremo ad indicare i rilievi di alcune strutture e poche note relative

¹⁰⁷ Si tratta del prodotto solido della distillazione del carbon fossile tipo litantrace effettuato nelle cokerie annesse ai moderni impianti di altoforno.

a qualche caso di particolare rilievo, come gli impianti secenteschi valdostani che rappresentano l'origine del sistema. Più numerose sono le testimonianze settecentesche, di cui ricordiamo in Italia quelli toscani, bresciani e canavesani, mentre giova segnalare quelli di Montbard, Cote d'Or o Dordogna in Francia e quelli nel Regno Unito di DUBY in Galles, Durban in Scozia o Pippingford nel Weald¹⁰⁸, quali esempi di altiforni divenuti monumenti culturalmente fruibili.

Gli scrittori tecnici che si occupano dell'altoforno a partire dal XVII secolo sono nu-



Resti dell'altoforno a carbone di legna sei-settecentesco di Pippingford in Galles (Gran Bretagna).

merosi al pari delle testimonianze materiali. Ci limiteremo a citare quelli che riportano informazioni originali e quindi concorrono a fornire un quadro particolarmente chiaro della struttura materiale di questo sistema produttivo.

Anzitutto occorre citare l'Encyclopédie di Diderot e D'Alembert che offre una decina di planches molto precise che illustrano compiutamente diversi impianti di altoforno dell'ambiente francese di fine secolo, anche se il vasto trattato non contribuisce in maniera significativa a illustrare i sistemi sul piano tecnico¹⁰⁹.

Giovan Battista Brocchi nella già citata Memoria sul Ferro Spatico del 1805¹¹⁰ fornisce una descrizione dettagliata del canecchio che a oltre un secolo dalla descrizione del Della Fratta dimostra di aver subito modificazioni soltanto per quanto attiene al

¹⁰⁸ Cleere, Crossey 1985, p. 250.

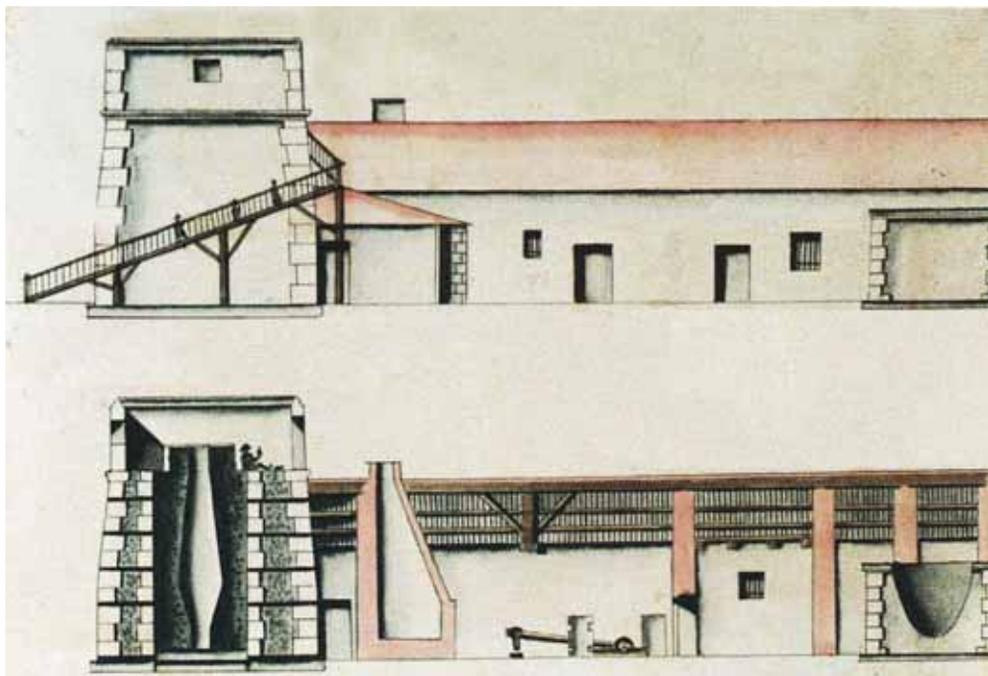
¹⁰⁹ Diderot, D'Alembert, 1751-1777, 2ème Section, pl. I.

¹¹⁰ Frumento 1972, p. 216.

8. La riduzione del minerale in metallo

profilo della camera di combustione. Egli sottolinea che: «*per formarsi un'idea dobbiamo immaginarci due imbuti di figura quadrangolare uniti insieme con le loro basi... La costruzione di questi forni è uniforme in tutti i luoghi della valle Trompia, Camonica e Sabbia: la loro altezza è di piedi 19 parigini (6,17 m) e la maggiore larghezza di piedi 51/2 (1,79 m)...La struttura di questi forni è quadrangolare: struttura riprovata dalla teoria e dalla pratica...*»¹¹¹.

Nel 1808 il Brocchi ritorna sul tema¹¹² fornendo una descrizione densa di particolari



Acquerello dei primi anni del XIX secolo illustrante l'altoforno a carbone di legna di Gurgo nel comune di Locana (Piemonte). Oltre alla grande struttura del forno (a sinistra), è documentata la fornace di arrostitimento del minerale (a destra) e il fuoco di affineria con il maglio a testa d'asino in posizione antistante.

costruttivi che conviene riportare, poiché riguarda strutture rimaste in uso, senza particolari modificazioni, per secoli. Egli osserva che i canneccchi «*presentano nel vuoto interno la forma di due piramidi unite verso il mezzo del forno con le loro basi e le facce sono dolcemente incurvate, a riserva dell'anteriore detta parete, che s'innalza perpendicolarmente. Il fondo del focolare è composto di due massi squadrati di arenaria rossa molto resistente al fuoco... (salese)... Ciascheduno di questi massi sovrapposti con diligenza l'uno all'altro ha la grossezza di circa nove onde. L'area del focolare è circoscritta da quattro pietre, parimenti di arenaria, l'anteriore delle quali si chiama il fettone, la posteriore il ceppo, e le laterali le scorze. Sopra queste pietre s'ergono le muraglie del forno costrutte di arenaria fina al luogo dove si uniscono le basi delle due piramidi, che porta il nome di corso di quadro: tutto il rimanente può essere di mattoni ordinari ...*

¹¹¹ Della Fratta Montalbano 1678, p. 84.

¹¹² Brocchi 1808, p. 67.

Fig. 79.

Fig. 80.

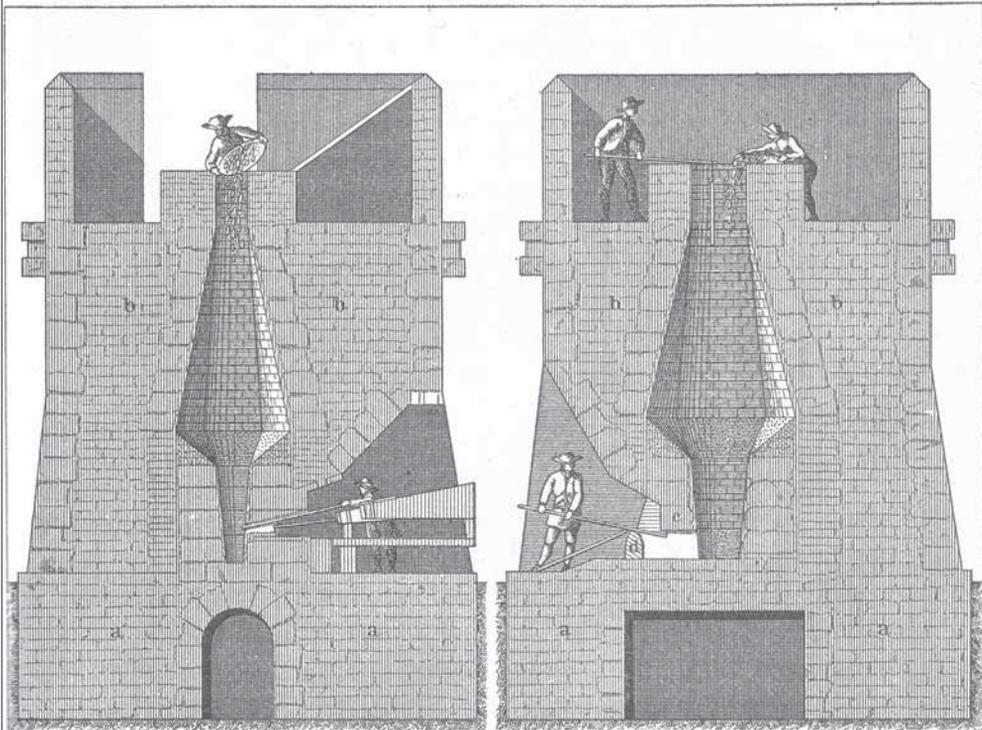
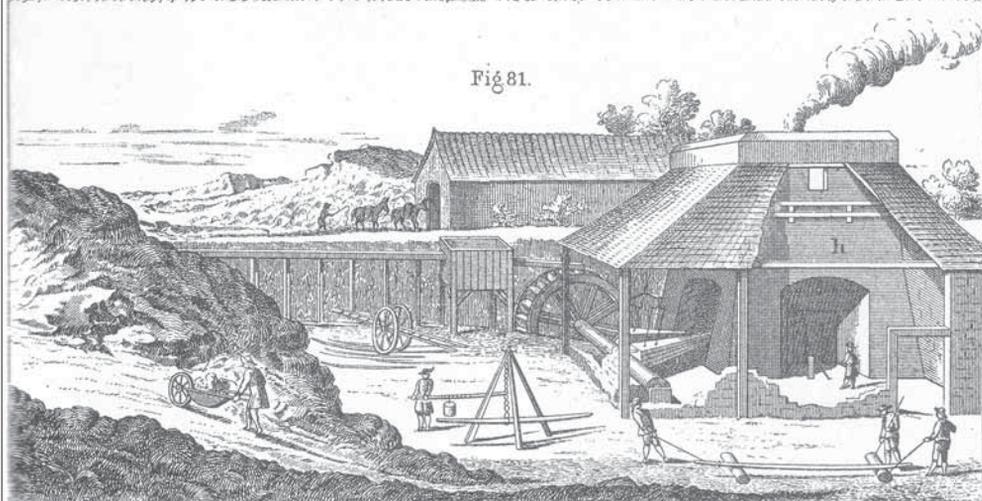


Fig. 81.



Disposition d'un haut-fourneau au commencement du xviii^e siècle.

Rilievo di un impianto di altoforno dal *Manuale della metallurgia del Ferro* (Tomo 1) di Adolf Ledeburg nell'edizione francese (traduzione di Barbary de Langlade, rivisto e commentato da F. Valton). Le due sezioni di altiforni a sezione ottagonale riguardano impianti costruiti nel 1716 dal fisico Réaumur. I disegni, conservati a lungo tra le sue carte, sono stati pubblicati nel 1761 da Jean Bouchu.

8. La riduzione del minerale in metallo

Dietro la schiena del forno havvi un gran muraccio...

Tutte le pietre che compongono le pareti del forno sono maestrevolmente tagliate. Le prime quattro che s'innalzano sopra il fettone si dicono brazzoli, e sono più strette delle altre incumbenti, che per conseguenza sporgono maggiormente all'infuori.

Per dare a quest'ultime più fermezza si suole sottoporvi due grosse spranghe di ferro, denominate stanghe, le quali sembrano sostenerle, appoggiando con ambe le estremità sui piloncelli laterali. Il forno è sormontato poi da una spezie di camino fatto



Altoforno a carbone di legna di Dufy in Galles (UK), costruito nel 1755 cessa l'attività nel 1810 e oggi è restaurato.

ad imbuto, che ha il nome di campana, attraverso il quale si versa la vena, e il carbone. Alla base del forno vi sono tre fori situati nella parte anteriore: uno nel mezzo sopra il fettone che riceve la canna del vento, l'altro laterale che dà l'uscita alle scorie, ed il terzo dal lato opposto tra il fettone che riceve la canna del vento, che ha l'aspetto di una finestrella quadrata, sta tra due pietre dette i caldadori, che possono risguardarsi come un brazzolo diviso per metà. I due ultimi fori si chiudono con polvere di arenaria impastata con argilla comune, e si aprono quando abbisogna con un colpo di spranga ... (Completano l'impianto) una grossa tromba, che attraversa la fucina, e che va a terminare nel forno, dove fa l'ufficio di mantice, un pesante maglio in un angolo destinato a frangere le scorie per ricavarne la granaglia di ferro, ed una cisterna da un altro dove si estingue la ghisa incandescente...».

Questa descrizione, purtroppo non corredata da illustrazioni, non consente un'immagine visiva della struttura, anche se è possibile riscontrare il lessico. Confronti significativi sono possibili con il disegno realizzato a metà del Settecento e relativo a un impianto toscano (v. p. 159). Coincidente con la descrizione del Brocchi è l'impianto valdostano di Pontey in Valmeriana (Valle d'Aosta), realizzato dal bergamasco Bernardo Mutta nel 1678 e abbandonato dopo pochi anni di esercizio. Poiché non si sono registrate sovrapposizioni, l'impianto valdostano rappresenta un notevole caso di studio con fornace di arrostitimento e magazzini a breve distanza¹¹³ (v. p. 154-155).

Nel 1779 il conte de Buffon nel descrivere un suo esperimento di fusione di minerali di ferro riporta le dimensioni dell'altoforno impiegato, nelle sue ferriere di Montbard: "... fornello di circa 20 piedi d'altezza e 5 piedi e mezzo di lunghezza"¹¹⁴.

Dalla seconda metà del XVII secolo nel comprensorio vallone viene impiegato un altoforno a doppia muratura con rinforzi a tiranti metallici o talora in legno che raggiunge l'altezza di 8 - 9 m. All'epoca è il più grande altoforno impiegato nell'industria siderurgica europea¹¹⁵.

Una delle figure singolari nell'universo tecnico italiano del XVIII secolo è il padre barnabita Ermenegildo Pini, delegato alle miniere dello stato di Milano e deciso fautore del rinnovamento della siderurgia milanese. Egli insiste per l'introduzione nei distretti siderurgici lombardi del forno norvegese che ritiene il più idoneo alla crescita tecnologica di quest'area, benché quello inglese funzionante a carbon fossile, in quegli anni fosse indiscutibilmente la soluzione tecnologica più avanzata. Nel suo trattato "*De venarum metallicarum escotione*"¹¹⁶ del 1779, egli illustra con grande dettaglio sia l'altoforno norvegese sia quello svedese. Entrambi a profilo ellittico con sezione circolare, con un'unica differenza nel crogiolo. In quello norvegese è ottenuto per restringimento del tino fino a formare una cavità cilindrica allungata, mentre quello svedese ha il crogiolo largo ottenuto come prosecuzione del tino senza particolari restringimenti.

All'inizio dell'Ottocento Hassenfratz conduce un'ampia ricognizione sugli altiforni¹¹⁷ impiegati nei vari comprensori industriali europei. In questa fase tutte le strutture sono a doppia muratura, con mantello portante esterno in pietre e malta, mentre il ventre, in laterizio refrattario, è costruito in un secondo tempo al fine di permetterne la ricostruzione o la manutenzione senza richiedere interventi sulla muratura esterna¹¹⁸.

Gli altiforni boemi illustrati da Hassenfratz¹¹⁹ non differiscono in maniera sostanziale dal canecchio, essendo ancora prevalentemente a profilo tronco-conico.

Nella seconda metà del XVIII secolo, impianti, come quello del de Buffon a Montbard, per la ventilazione dell'altoforno impiegano ancora i mantici, forse per evitare

¹¹³ Nicco 1987, p. 18.

¹¹⁴ de Buffon 1779, p. 49.

¹¹⁵ Krulis Randa 1967, p. 253.

¹¹⁶ Pini 1985, p. 78.

¹¹⁷ Hassenfratz, 1812, p. 245.

¹¹⁸ Ivi.

¹¹⁹ Hassenfratz, 1812, p. 245 e Brocchi 1808, p. 67.

di introdurre nel tino l'aria umida e fredda prodotta dalle più moderne trombe idroeoliche¹²⁰. Peraltro, i mantici risultano ancora largamente impiegati negli altiforni anche nella prima metà del XIX secolo come si evince dal trattato del De Saint Ange "Metallurgie pratique du fer" pubblicato a Parigi tra il 1835 e il 1838 contiene eccezionali illustrazioni derivanti dal rilievo diretto di numerosi impianti, sia a carbone di legna, sia a carbon fossile, oltre alla descrizione tecnologica dell'altoforno, la più completa ed esauriente che si conosca. Egli osserva che per fissare l'altezza del forno occorre considerare la natura del combustibile e del minerale¹²¹. L'altezza cresce nel caso di combustibile compatto e minerale più difficile a fondersi; fissando 6 - 6,25 m (18 - 19 piedi) e più in generale 8 - 9 m. In Siberia è noto un forno alto 13,6 m¹²². Nei forni a carbon fossile l'altezza è di 12 - 14 m nel caso di coke leggero e fino a 16 m nel caso di combustibili più compatti. Il De Saint Ange fornisce ulteriori misure di dettaglio, per un forno a carbone di legna alto 7 - 8 m e sostiene che il foro del crogiolo vada posto a 1,25 m, mentre per un forno alto 11 - 12 m il foro del crogiolo si deve porre a 1,6 - 1,85 m di altezza¹²³. In questo caso si ottiene ghisa grigia¹²⁴.

In merito alle forme, sono previste strutture prismatiche a base quadrata o a tronco di piramide. Tutti i forni nel XIX secolo sono costruiti sul principio della doppia muratura, con il mantello esterno realizzato in pietre connesse con malta o terra trattenuta da un'intelaiatura di legno¹²⁵. Gli altiforni a carbone di legna sono solitamente muniti di tetto, mentre quelli a coke, più grandi, sono scoperti. Altre fonti, utili per la ricostruzione della struttura materiale dell'altoforno a carbone di legna, riguardano i numerosi censimenti napoleonici spesso dotati di corografie dettagliate.

Il Settecento rappresenta una fase cruciale nell'evoluzione della struttura materiale dell'altoforno. Diversi distretti siderurgici europei conducono sperimentazioni autonome, talvolta incentrate sulle peculiarità del minerale da trattare o su problemi imposti dalle condizioni esterne, come nel caso dei diversi tentativi inglesi della seconda metà del Settecento per l'impiego del carbon fossile stimolata dalla particolare penuria di legname.

¹²⁰ de Buffon 1779, p. 54 e Daumas 1980, p. 157.

¹²¹ De Sain Ange 1835, p. 86.

¹²² Ivi, p. 84.

¹²³ Ivi, p. 86.

¹²⁴ La ghisa grigia o ghisa lamellare è il prodotto più comune derivante dall'altoforno ed è una lega ferro-carbonio con tenore di carbonio compreso tra 2 e 6,6%, ove quest'ultimo si trova nella massa metallica in forma di micro-lamelle di grafite.

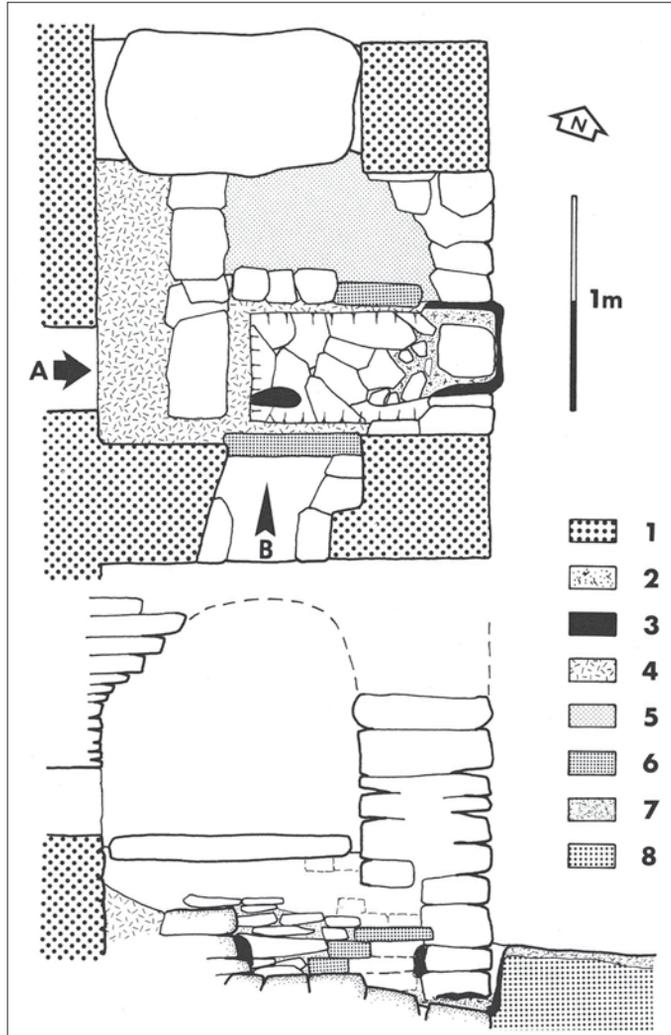
¹²⁵ de Buffon 1779, p. 104.

9. L'affineria

La definizione del procedimento indiretto che prevede la produzione di ghisa greggia (*ferraccia*) come primo stadio della riduzione dei minerali di ferro ha imposto un sistema di affinazione con il quale giungere alla produzione di ferro e acciaio.

Sin dalla protostoria i metallurgisti hanno messo a punto procedimenti per la fusione di piccole quantità di ferro al crogiolo con lo scopo di produrre acciaio. È forse a questa metodologia che si riferiscono quegli ignoti metallurgisti del tardo Medioevo quando mettono a punto il procedimento indiretto di riduzione, magari rifondendo quelle piccole quantità di ghisa che sempre accompagnano il processo diretto di riduzione.

Nell'ambiente bresciano-bergamasco, ove pare affermarsi con largo anticipo il procedimento indiretto, quantomeno per l'ambiente italiano, l'affinazione della ghisa avviene nel "fuoco grosso"¹, e può essere condotta con due differenti procedimenti: per decarburazione della massa spugnosa o per fusione². Nel primo caso la massa di ghisa viene portata al colore bianco ed esposta per un tempo considerevole alla fiamma. In questo modo si ottiene una



Affineria attribuibile all'inizio del XVII secolo, scavata a Stony Hazel nel Lancashire (UK) (da Tylecote ridisegnato), operante per fusione del pane di ghisa a porzioni successive. 1. Struttura; 2. Sabbia carboniosa; 3. Scoria; 4. Concolato; 5. Ceneri; 6. Laterizio; 7. Sedimento ricco di scorie; 8. Suolo; A. Foro di passaggio della lastra di ghisa; B. Cavo della tuyère.

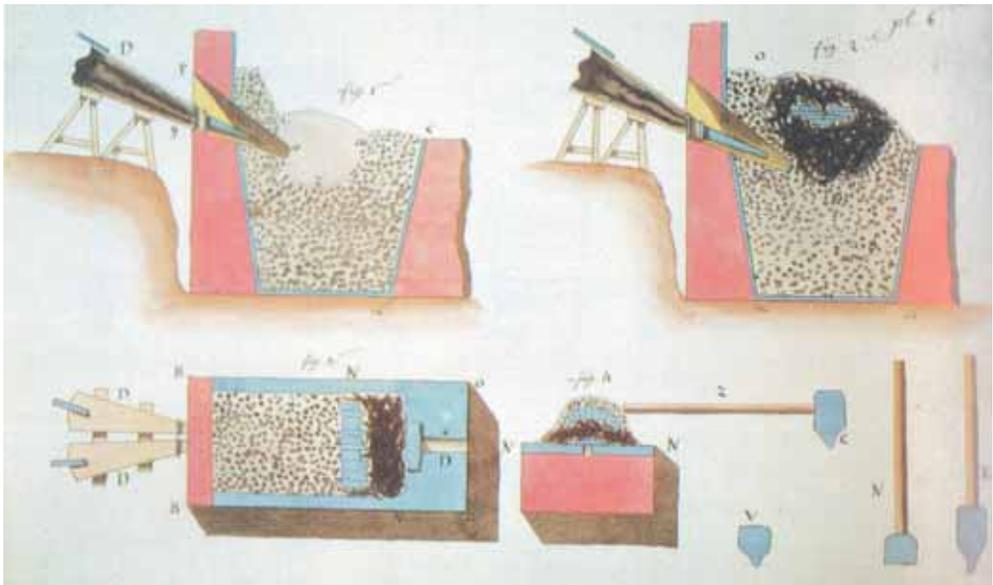
¹ Muthuon 1808, p. 52.

² Questa struttura produttiva deriva direttamente dal basso fuoco nella versione catalano - ligure.

9. L'affineria

spugna di ferro piuttosto simile al blumo prodotto al basso fuoco, che va condensata al maglio mediante martellatura. La temperatura che si raggiunge in questo tipo di fuochi grossi non supera i 1100°C. La struttura materiale del fuoco grosso è molto simile al basso fuoco a catasta e il processo di riduzione, non differisce in maniera sostanziale da quello di riduzione diretta del minerale.

Nel secondo caso la struttura di protezione del fuoco è molto più accurata e normalmente sul piano di lavoro si trova una sorta di crogiolo in muratura, in qualche misura



Affineria dai disegni di età Napoleonica riferiti a un impianto valdostano dei primi anni dell'Ottocento (Archivio di Stato di Torino).

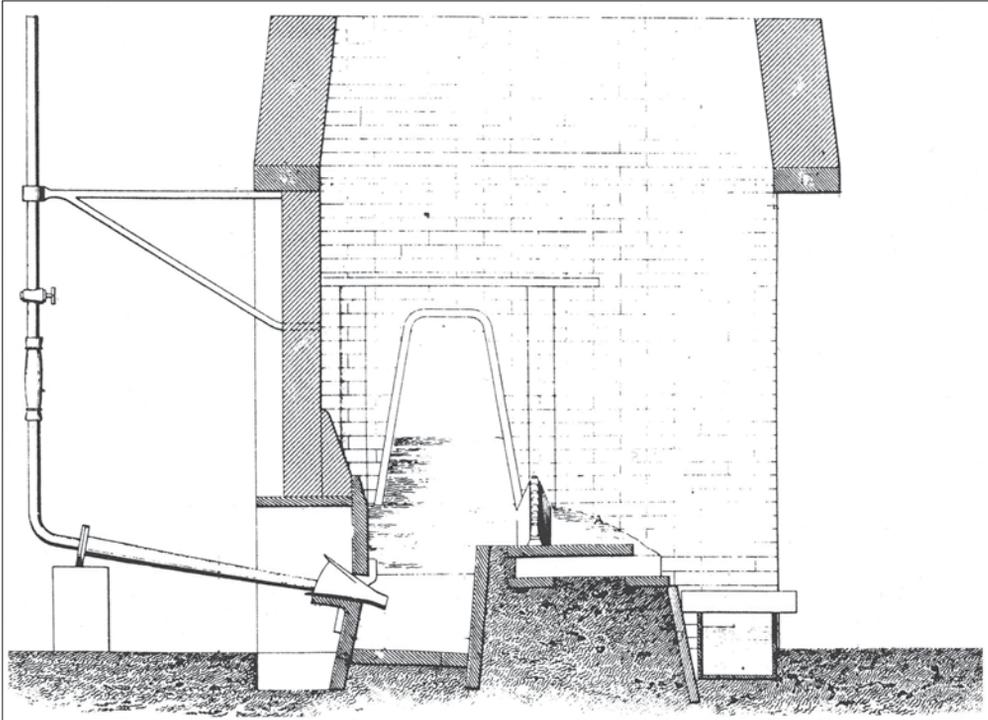
simile all'antico forno a pozzetto. L'aggiunta di una cortina di materiali sciolti consente una migliore protezione rispetto al raffreddamento. Questo impianto richiede anche macchine soffianti più potenti e raggiunge i 1.350° consentendo la fusione della ghisa che viene preventivamente sminuzzata. Nel corso del secolo XIX nei contesti produttivi dei grandi impianti di altoforno vengono messi a punto i cubilotti, ovvero dei forni a camera con profili analoghi a quelli degli altiforni che affinano la ghisa mediante fusione.

Analisi dei documenti

Un'affineria probabilmente attribuibile all'inizio del XVII secolo è stata scavata a Stony Hazel nel Lancashire. I resti materiali, letti piuttosto bene, confermano la grande analogia di questa struttura con i bassi fuochi a catasta³. Sulla base dei pochi elementi di confronto disponibili è evidente l'analogia con il "fuoco grosso" bresciano e con le affinerie "alla tedesca" largamente diffuse in tutta Europa, a partire dalla seconda metà del XVII secolo.

³ Tylecote 1979, p. 88.

Un estimo dell'affineria di Bon Port nel Giura Francese del 1623⁴ riporta una sommaria descrizione di questa tipologia di fuoco da cui apprendiamo dell'esistenza di un focolare quadrangolare, protetto da tre pareti di ferro, con il fondo piatto, anch'esso metallico. Una piastra mobile di ghisa costituisce la porta. La ventilazione è garantita da due mantici che hanno la tuyère in rame fuso. Benché il documento sia poco chiaro, è confermata la presenza di un camino con relativa cappa supportata da spranghe di ferro forgiato⁵. Il documento non fornisce informazioni circa il processo di affinazione



Affineria alla tedesca dal trattato del De Saint Ange. Si può facilmente osservare la similitudine con il basso fuoco Catalano-ligure (v. p. 138).

ma sembra classificabile come affineria alla tedesca.

Pochi decenni dopo il Della Fratta descrive con dovizia di particolari il “fuoco grosso” bresciano⁶ confermando nel dettaglio l’analogia con il basso fuoco a catasta. Per “*ridur li suddetti pezzi di metallo agro in buono, si deve aver acomodato un focolaio a canto ad un muro*”. Questo deve essere dotato di un catino, inoltre “*le parti laterali del focolaio si serrano eccetto a canto al muro, dove alcuni adottano una lastra di ferro*”.

Una trattazione completa, del processo di affinazione della ghisa si trova nella Metallurgie Pratique du Fer. Il De Saint Ange precisa che vi sono tre metodi praticati su larga scala per l’affinazione della ghisa⁷: 1. al carbone di legna, nei bassi fuochi aperti,

⁴ Pelet 1971, p. 12.

⁵ Ivi, p. 40.

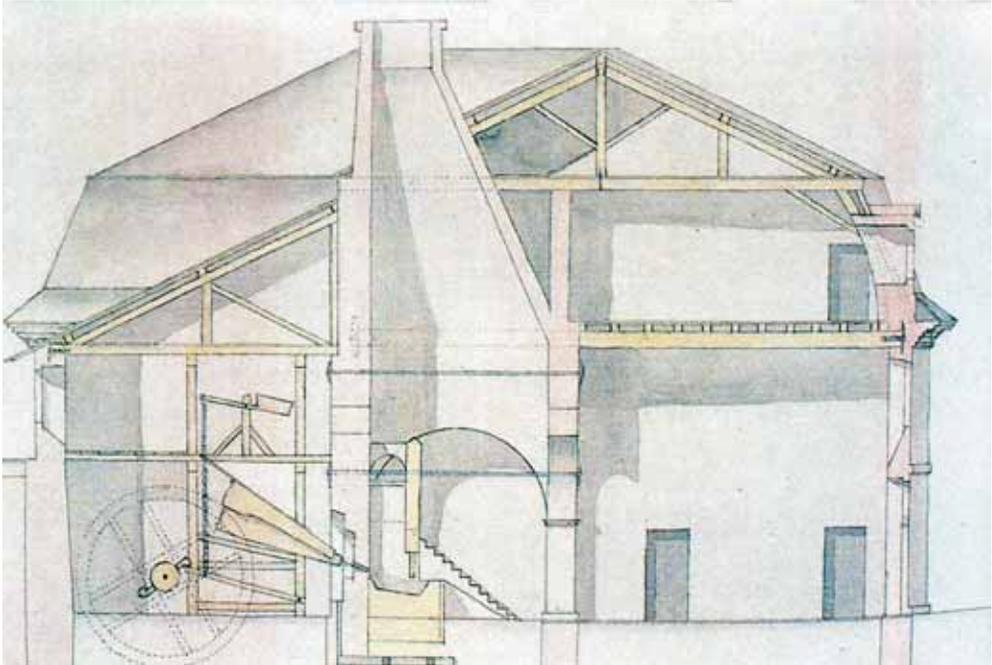
⁶ Della Fratta Montalbano 1678, p. 143.

⁷ De Saint Ange 1833, p. 18.

9. L'affineria

con successiva battitura al maglio, secondo il metodo tedesco o catalano; 2. alla torba nei forni a riverbero; 3. all'inglese, fondendo prima la ghisa al coke nei forni chiamati "affinerie" e decarburandola successivamente allo stato liquido mediante un fuoco alimentato a torba. Ottenuto il blumo, per colata, questo viene "tirato" al laminatoio producendo lame o verghe profilate.

Nelle acciaierie della Champagne si segue un processo misto definito "champenois" consistente nell'affinare la ghisa nei forni a riverbero e quindi batterla al maglio come



Progetto dell'affineria di Quart (Valle d'Aosta) in un acquerello dei primi anni del XIX secolo (Archivio di Stato di Torino).

nelle acciaierie tedesche⁸.

L'introduzione dei forni a riverbero e della torba come combustibile è un'innovazione ottocentesca, piuttosto tarda. In questo secolo va collocato il grande fiorire di metodi alternativi per la riduzione della ghisa che si avvicinano a quelli moderni.

In ogni caso, fino alle radicali innovazioni del nostro secolo uno dei metodi più usati è quello basato su una variante, non troppo evoluta, del "fuoco grosso bresciano".

⁸ De Saint Ange 1833, p. 25.

10. La fucina di trasformazione

Con l'evoluzione dei sistemi produttivi metallurgici è venuto differenziandosi il ruolo della fucina, nella quale vengono prodotti i manufatti, da quello della ferriera nella quale si pratica la riduzione del minerale in metallo. In antico, secondo le evidenze archeologiche e i documenti, la differenziazione non è così netta. Nella stessa ferriera, oltre alla riduzione del metallo, si provvede alle lavorazioni plastiche per la produzione dei manufatti finiti.

Nelle fucine antiche, protostoriche, romane o alto-medievali, le lavorazioni plastiche avvengono unicamente mediante azioni di martellatura manuale, riscaldando il massello alla forgia, spesso organizzata a terra, e con il contrasto dell'incudine o di un semplice masso. Più tardi, nel corso del Medioevo, le macchine ad azionamento idraulico rivoluzionano la tecnologia produttiva introducendo la macchina del maglio a testa d'asino destinato ad avere un'ampia applicazione per molti secoli.

Uno dei problemi fondamentali nella ricostruzione della struttura materiale di una fucina medievale è quello relativo all'origine e alla diffusione dei sistemi di azionamento idraulico, che implicano la nascita del maglio meccanizzato e la trasformazione del mantice. Le due macchine, azionate dall'energia idraulica, unitamente all'evoluzione dei forni, segnano in maniera determinante lo sviluppo della tecnologia e della capacità produttiva metallotecnica, in particolare di quella siderurgica.

L'ingresso nell'Occidente medievale di queste strutture tecnologiche è legata allo sviluppo e alla diffusione del mulino mosso dalla ruota idraulica, ma conserva notevoli punti oscuri, alla cui conoscenza concorre, sia l'indagine storica, sia quella archeologica.

L'applicazione della ruota idraulica alla mazza pare derivare dalla spinta all'innovazione indotta da una domanda crescente di metallo stimolata, non soltanto dall'armamento degli eserciti, ma anche dallo sviluppo edilizio e dalla ripresa dei commerci nel Mediterraneo collocabile tra XI e il XII secolo¹.

Una delle chiavi dello sviluppo della struttura materiale delle fucine è forse da ricercare nei nuovi intensi contatti che si definiscono tra l'Oriente progredito e l'Occidente agricolo, dopo il grande contrasto alto-medievale tra i due mondi². Questi nuovi rapporti vengono suggellati dalla ripresa su vasta scala delle relazioni commerciali ed è forse attraverso questa via che le numerose innovazioni tecnologiche maturate in Oriente raggiungono l'Europa continentale attraverso molteplici rotte. Bertrand Gille avvalorava questa tesi che vede l'Occidente mutuare lo sviluppo tecnologico dell'Oriente, fino a considerare una lontana origine cinese di tutte le principali conquiste tecnologiche in campo metallurgico dell'Europa³.

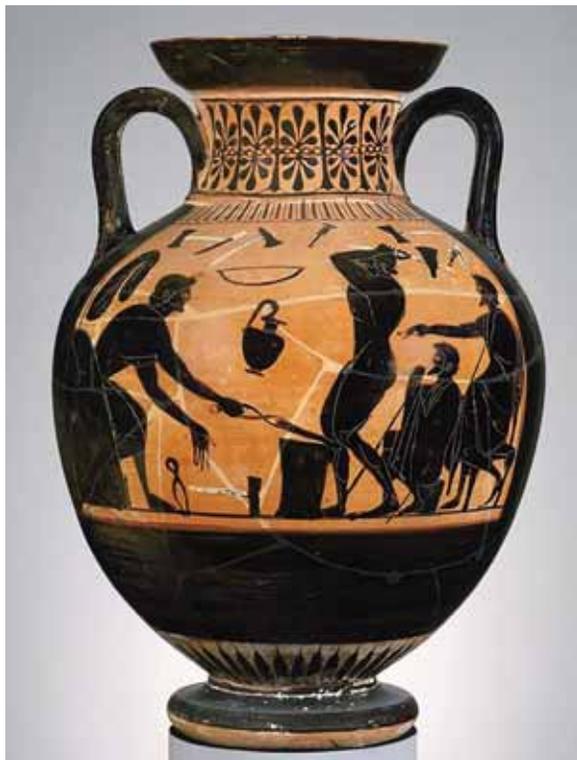
¹ Boutruche 1978, p. 49.

² Gille 1970, p. 151.

³ Ivi, p. 155.

Fucine o atelier di fabbri sono noti sin dalla preistoria, sia attraverso i rari documenti iconografici, sia sulla base delle testimonianze archeologiche.

La struttura materiale che emerge, rileva con una certa ricorrenza di attrezzi e impianti che si può considerare stabile per l'intero periodo che va dalla preistoria al Medioevo. Tralasciando il fatto che gli atelier antichi solitamente comprendono l'intero ciclo dalla riduzione dei minerali in metallo⁴, si può con buona sicurezza affermare che la struttura materiale è rimasta pressoché invariata per oltre due millenni⁵.



La bottega del fabbro (o di Efesto), con scena di fucinatura in un vaso attico a figure nere di VI secolo a.C. Singolare la raffigurazione di numerosi attrezzi.

forgia che è il perno intorno al quale ruotano tutte le fasi produttive. Nelle strutture più antiche, come già osservato, questo coincideva con il forno di riduzione del metallo⁷, il cui diverso impiego può derivare semplicemente dal differente tipo di marcia.

La forgia della fucina antica si accompagna costantemente con il mantice azionato manualmente. Soltanto a partire dal Medioevo compaiono meccanismi azionati da una ruota idraulica. Questo sistema verrà sostituito gradualmente a partire dalla fine del

⁴ Nef 1982, p. 518.

⁵ S'intende qui ricostruire la struttura materiale della fucina di trasformazione e la sua evoluzione tralasciando gli aspetti della tecnologia metallurgica in quanto argomento già trattato nei capitoli precedenti.

⁶ Come discusso in precedenza (v. § 3 p. 45), trattamenti termici quali la tempra seguente la carburazione superficiale di particolari in ferro, in certi contesti evoluti sono accertati già nel corso del I millennio a.C.

⁷ Cima 1986, p. 173.

10.1 La struttura materiale

La fucina è l'ambiente nel quale avvengono le lavorazioni meccaniche mediante deformazione plastica a caldo dei metalli ed eventualmente, la tranciatura, la limatura e altre lavorazioni meno consistenti, oltre ai trattamenti termici con lo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche del metallo⁶.

Le fasi tecnologiche essenziali nella produzione del manufatto riguardano il riscaldamento di una porzione adeguata di metallo e la sua lavorazione per deformazione plastica, realizzata mediante martellatura con diverse tipologie di percussori.

Il complesso di lavorazioni basate sul riscaldamento del materiale, è incentrato sul fuoco della

secolo XVI quando incomincia la lenta diffusione della tromba idroeolica.

Un altro elemento fondamentale nel corredo materiale della fucina è l'incudine, consistente in un basamento metallico rigido, sul quale viene posto l'oggetto da martellare ma i documenti riportano anche l'uso di pietre particolarmente dure sulle quali si esegue la fucinatura, come nel mito di Skallagrímr (v. § 1, p. 18 e § 2, p. 38).

Elementi ulteriori riguardano lo strumentario minuto costituito da diversi tipi di martello, tenaglie per la manipolazione del metallo incandescente, e un complesso di strumenti specifici quali lime, bulini, scalpelli ecc., adatti alle lavorazioni minute⁸. In questo complesso di strumenti rientra il trapano manuale impiegato per forare le pareti sottili dei vasi o parti di lamiera utilizzate nella costruzione di corazze, bauli o casseforti. Se ne conoscono di tre tipi: ad archetto, a volano e a gomito. Tra tutti il più antico è indubbiamente quello ad archetto, già presente nello strumentario preistorico.

Un ulteriore attrezzo talora presente nelle fucine è quello della mola abrasiva, che a partire dalla fine del Medioevo viene a sua volta meccanizzata.



Kylix di VI secolo a.C. con la raffigurazione del fabbro (o Efesto) intento alla forgiatura di un manufatto (Altes Museum - Berlino).

(A lato) Tenaglie a becco d'anatra della seconda età del Ferro da Bibracte (Francia).



Analisi dei documenti

Tra i documenti più significativi ricordiamo il vaso attico dipinto a figure nere, del VI secolo a.C, proveniente da Orvieto, che mostra l'interno di una fucina con due fabbri intenti alla lavorazione all'incudine e due gentiluomini seduti a osservare le operazioni⁹. Uno dei fabbri è mostrato in atto di martellare il manufatto mediante un grande martello a battente largo e immanicatura lunga, mentre il secondo tiene il manufatto con le tenaglie. Di rilievo, nella stessa figura, è un probabile gancio collocato all'estremità dei manici che consente di serrarli dopo la presa sfruttando l'elasticità delle aste e risparmiando lo sforzo prolungato della mano per trattenere il ma-

⁸ Anche per questa tipologia di reperti esiste una discreta bibliografia, sia storica, sia archeologica.

⁹ Forbes 1962, p. 60. Forse una delle tante raffigurazioni di Efesto.

nufatto durante la percussione (v. fig. a p. 178). Meccanismi di questo tipo sono in uso ancora oggi. Nella stessa immagine, in alto sono mostrati diversi oggetti interpretabili come attrezzi e prodotti. Si riconoscono un martello, un'ascia, una sega, una daga, un coltello e un probabile scalpello o bulino. La presenza di una brocca suggerisce la pratica dei trattamenti termici.

Una pelike attica conservata nel Museo Archeologico di Monaco¹⁰ mostra Efesto, protettore della metallurgia, che abbraccia un uomo tenendo in una mano una



tenaglia a becco d'anatra e dall'altra una mazza a lungo manico caratteristica dello strumentario da fucina greco¹¹. Tra le numerose tenaglie antiche rinvenute nel contesto del Mediterraneo quelle che maggiormente offrono confronti con quelle dell'immagine dipinta sul vaso sono conservate al museo di Villa Giulia a Roma.

Una notevole struttura relativa a un atelier di fabbro dell'età del Ferro è stata scoperta a breve distanza dal castelliere di Biyn Y Castell Hillfort nel Ffeistiniog in Galles¹², dove lo scavo ha evidenziato una serie di spazi dedicati alle lavorazioni (v. p. 182 e 183).

Un'importante serie di reperti proto-storici, rinvenuta nella valle dell'Orb (Herauld - Francia)¹³, comprende diversi attrezzi e alcune tessere in piombo coniate, probabilmente, impiegate come monete all'interno di un sistema minerario. Su una faccia riportano gli attrezzi da fucina, tra cui si riconoscono tenaglie, martello e bulino. Analogamente una moneta etrusca rinvenuta a Populonia¹⁴, su una faccia riporta gli attrezzi principali della fucina, tenaglie e martello, accompagnati da quattro sfere.

Una tenaglia a becco d'anatra di buona fattura proviene dal sito La Tene di Bibracte nel comune di Nièvre (Saone et Loire - Francia)¹⁵ ed è attribuibile al V - IV secolo a.C. Numerosi attrezzi tra cui tenaglie e martelli di attribuzione romana sono conservati in



Tessera in piombo dalla valle dell'Orb (Herauld - Francia).

(Sotto) Moneta etrusca da Populonia (Toscana).

(A lato) Grandi tenaglie etrusche dal Museo di Villa Giulia (Roma).

¹⁰ Mondini 1986, p. XLVv.

¹¹ Si tratta della raffigurazione del mito del ritorno di Efesto.

¹² Crew 1984, p. 95.

¹³ Barroul, Gourdioler 1982, p. 79.

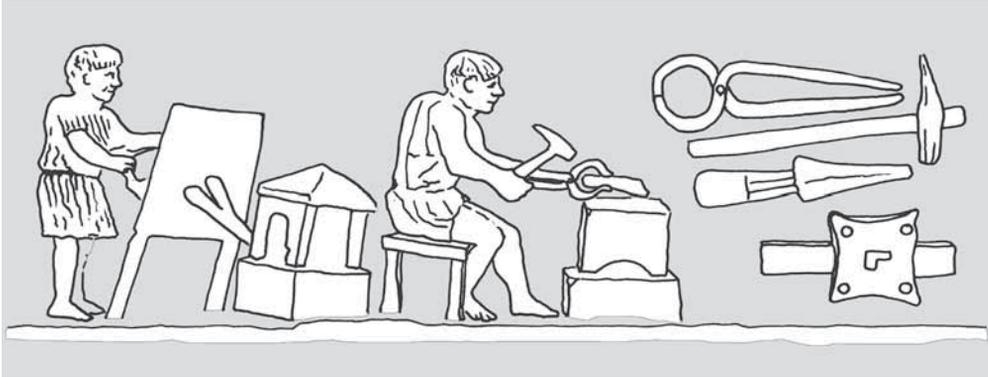
¹⁴ Tognarini, Bucci 1986, p. 173.

¹⁵ Dechelet 1914, p. 1543.

quasi tutti i principali musei archeologici d'Europa.

Strumenti celtici da fucina tra cui tenaglie e martelli di diversa foggia sono stati rinvenuti a Monking in Baviera e tenaglie a becco d'anatra, un'incudine piramidale e un martello provengono da Nikolusberg in Austria¹⁶.

I documenti di età Romana noti riguardano anche numerose raffigurazioni contenute nelle pietre tombali. La prima, riferibile al I secolo d.C., si trova nella catacomba



(Sopra) Stele da Aquileia con scena di fucina dove si vede il fabbro produttore di serrature e l'aiutante al mantice.

(Sotto a sinistra) Incisione della lastra del fabbro con scena analoga dalla catacomba di Domitilla (Roma)

(Sotto a destra) Incisione alla base della stele del fabbro Fabio Saturnino.

di Domitilla e mostra una fucina composta da una forgia realizzata su una piattaforma accostata a una cortina che protegge il mantice dal surriscaldamento e un'incudine con basamento¹⁷. Sono raffigurati anche due addetti. Il primo aziona il mantice e il secondo, munito di tenaglie e martello, esegue la lavorazione all'incudine.

Una scena del tutto analoga è contenuta alla base di una stele funeraria in calcare rinvenuta ad Aquileia¹⁸. Qui i mantici, nascosti dalla cortina di protezione, sono probabilmente due, data la presenza di due tubi portavento riuniti in un'unica "tuyere". Anche la forgia risulta più elaborata, poiché comprende una struttura protettiva complessa con

¹⁶ Moscati 1991, p. 443.

¹⁷ Mazzoleni 1987, p. 14.

¹⁸ Cuscito 1981, p. 15.

un piccolo tetto interpretabile come una cappa per la raccolta dei fumi. Il fabbro all'incudine è seduto e lavora il metallo con tenaglie e martello. Il tipo di tenaglie mostrato è a becchi ricurvi e il martello ha un'ala a penna. Nello stesso bassorilievo sono raffigurati una serratura (forse uno dei prodotti) e una sorta di coltello a doppio tagliente, interpretabile come manufatto o forse come attrezzo (scalpello o lima).

Un'altra stele funeraria di Aquileia mostra il fabbro Flavio Saturnino intento a lavorare all'incudine con un martello a battente largo e tenaglie serrate con la sinistra che trattengono il manufatto¹⁹.

Una stele romana raffigurante un fabbro, non meglio inquadrata cronologicamente, è stata scoperta a Florange in Normandia²⁰.

Presso Saint-Dié nei Vosgi, nell'*oppidum* di "La Bure"²¹ è stata rinvenuta una stele in travertino rosa locale, raffigurante un fabbro con la moglie, databile al II secolo d.C. L'artigiano è in piedi davanti al banco di lavoro ove sono riconoscibili tre tipi d'incudine. Egli impugna con la sinistra un paio di tenaglie che stringono un manufatto e con la destra il martello. La figura femminile al fianco reca una coppa e una bottiglia, in atto di offrire da bere all'artigiano. Nello stesso sito recenti scavi



Il castelliere della tarda età del Ferro di Bryn Y Castel Hillford (Galles). In basso nella fotografia l'atelier del fabbro documentato con la pianta riportata nella pagina a fronte. (Da <https://coflein.gov.uk/en/site/95496>).

¹⁹ Mazzoleni 1987, p. 14.

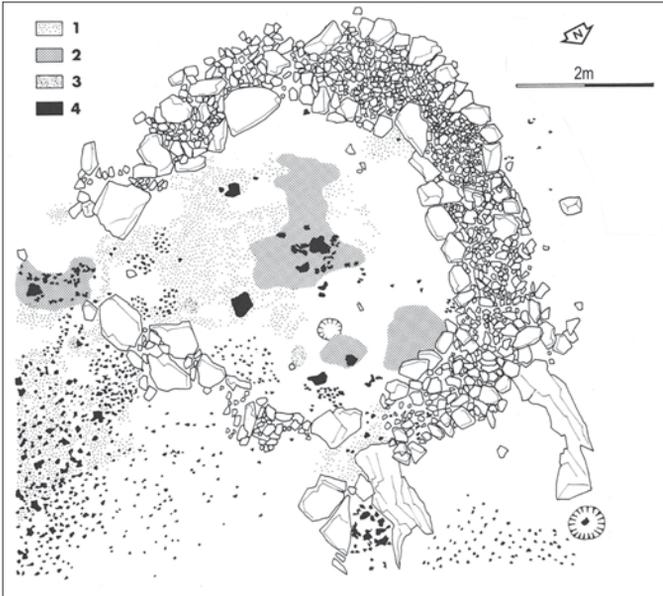
²⁰ Girardot 1970, p. 8.

²¹ Tronquart 1986, p. 71.

hanno condotto al rinvenimento di due incudini a doppia punta di grandi dimensioni (la maggiore pesa 23 Kg), del tutto simili a quella raffigurata nella stele²².

Un rinvenimento archeologico a Silchester in Gran Bretagna databile al IV secolo d.C.²³, riguarda un corredo di fucina costituito da una tenaglia a becchi ricurvi ed un'incudine adatta a essere collocata su un basamento ligneo.

Nel museo di Metz, nel Nord della Francia, è conservata una stele funeraria rinvenuta il secolo scorso con bassorilievi riportanti un interessante insieme di attrezzi

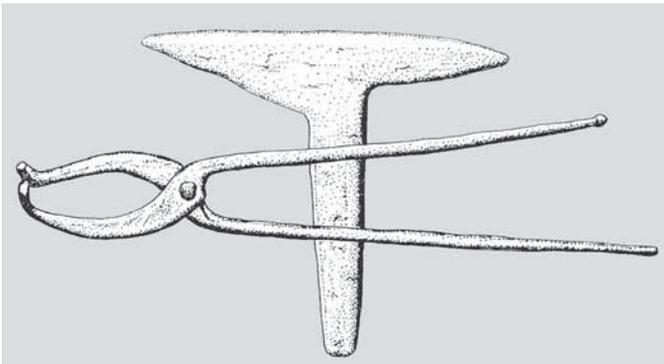


da fabbro, tra cui martelli, tenaglie e incudine²⁴.

Un'altra stele proveniente da Schwarzerden nella Sarre mostra un fabbro (o forse il dio Vulcano), con pinze, che siede di fronte a un'incudine a forma di parallelepipedo.

Nel Museo della città sono conservati numerosi attrezzi da fabbro e da minatore quali martelli, picconi, pinze, lingotti di ferro a forma di baccello. Tutti questi reperti provengono da vecchi scavi urbani; tra essi una piccola incudine a forma di parallelepipedo è paragonabile a quella rappresentata nella stele.

Una stele proveniente da Hentern (Trier-Saarburg) riprende il tema di quella proveniente da La Bure, con un fabbro che impugna le tenaglie, in atto di bere da un boccale, accanto alla moglie che reca un fuso²⁵.



L'atelier di fabbro metallurgista nel castelliere di Bryn Y Castel Hillford nel Galles (pagina a fronte). 1. Detrito bruno carbonioso; 2. Suolo concotto; 3. Argilla concotta; 4. Scorie. (Da Crew ridisegnato).

(Sotto) Incudine e tenaglie a becchi ricurvi di età tardo-romana da Silchester (Gran Bretagna).

²² Tronquart 1986, p. 72.

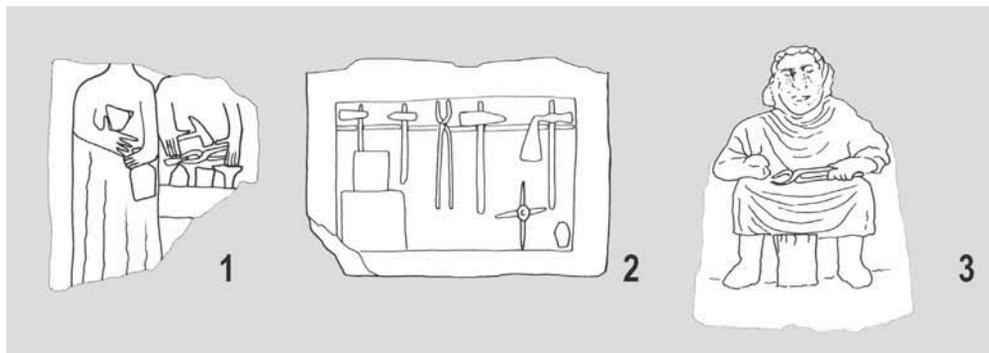
²³ Forbes 1962, p. 62.

²⁴ Buisson 1982, pl. XLVIII.

²⁵ Cuppers 1983, p. 106 e p.89.

Ascrivibili a questo periodo sono anche numerose tuyère rinvenute nel Giura Vo-dese, in Canavese e nei Pirenei, prevalentemente attribuibili a forni di riduzione, ma in qualche caso forse a fuochi di forgia. Singolare a questo proposito il manufatto illirico proveniente da Sanski Most in Bosnia²⁶.

Tra i reperti di rilievo vanno ancora segnalate le incudini a doppia punta provenienti dall'*oppidum* di La Bure (Francia), quelle a forma parallelepipedica provenienti da Schwarzenacher presso Homburg nella Sarre (Francia) e da Newport in Gran Breta-



1. Stele frammentaria del fabbro dall'*oppidum* di La Bure presso Saint-Dié nei Vosgi (Francia), raffigurante l'artigiano intento a lavorare all'incudine con accanto la moglie che gli offre da bere. Interessanti i diversi tipi di incudini.

2. Base di una stele funeraria di età Romana conservata al Museo di Metz (Francia) con bassorilievi raffiguranti attrezzi da fucina.

3. Stele funeraria di fabbro da Schwarzerden (Sarre - Francia) raffigurante un fabbro o forse il dio Vulcano.

gna, oltre ad altra proveniente da una località francese imprecisata. Singolare appare il piccolo martello da calderaio conservato al Museo di Antichità di Sain-Germain-en-Laye.

I documenti altomedievali si riferiscono a corredi tombali merovingi e riguardano l'ambiente germanico. Da Jutas in Ungheria proviene un paio di tenaglie insieme con altri attrezzi in ferro e a Neuwied in Renania una tomba ha restituito un martello, un crogiolo e altri strumenti da fabbro molto alterati. Questi contesti sono attribuibili al VI - VII secolo d.C.²⁷. Importanti rinvenimenti legati alle attività metallurgiche riguardano il sito longobardo di Belmonte (Torino - Piemonte)²⁸, dove in un'area caratterizzata da un grande accumulo di scorie si sono rinvenuti numerosi manufatti metallici, tra cui diversi picconi, asce, una stadera ed altri elementi in ferro. Il repertorio è completato da una tenaglia a lunghe branche con ganasce a sezione rettangolare irregolari, un compasso e una lima. Una recente revisione dei vecchi scavi ha confermato la presenza di una struttura che potrebbe essere interpretata come un fuoco di forgia o addirittura come un basso fuoco a catasta.

Un eccezionale complesso di reperti metallici riferibili ad attrezzi da fucina è stato scoperto al sito longobardo di Mezoband in Romania e comprende due tenaglie a ga-

²⁶ Stipcevic, 1966, p. 133.

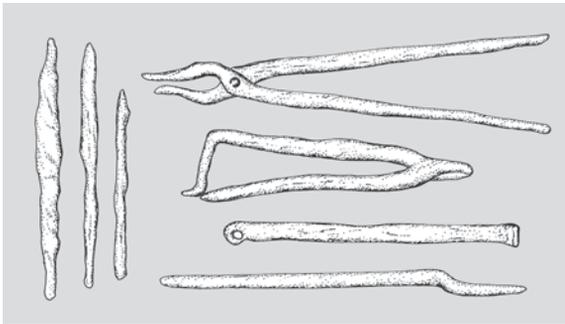
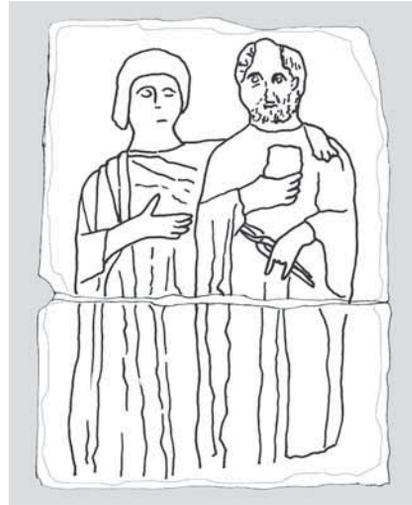
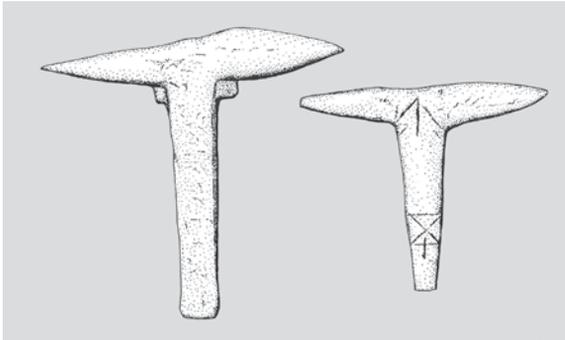
²⁷ Salin 1957, p. 213.

²⁸ Scafile 1971, p. 41.

nasce allungate con profilo ellittico, quattro martelli, un incudine, un probabile trapano a volano, alcuni bulini e forse una lima²⁹.

Altri interessanti attrezzi da fucina longobardi, tra cui piccole incudini, tenaglie, lime e martelli provengono da tombe di orefici scoperte a Brno in Moravia e a Grupignano di Cividale in Friuli³⁰.

Nel Salterio d'Utrecht del IX secolo è riportata un'illustrazione mostrante una struttura molto simile alle forge di età Romana costituite da un piano di lavoro con cortina



Stele romana del fabbro da Trier (Germania).

(A lato Sopra) Incudini romane da Swarzenacher (Herault - Francia).

(A lato sotto) Corredo proveniente dalla tomba di un orafo da Jutas (Ungheria).

di protezione del mantice e due addetti di cui uno al mantice e l'altro affacciato al focolare con tenaglie e martello a lungo manico³¹. Questa struttura, già discussa in precedenza (v. § 8, p. 129), può interpretarsi indifferentemente come basso fuoco a catasta o fuoco di forgia³².

Un documento archeologico di eccezionale valore, anche se non direttamente riferibile a una fucina è costituito dal rinvenimento fortuito, ad opera di un contadino, sul fondo prosciugato del lago Mästermyr Chest nell'isola di Gotland in Svezia, di una cassetta di quercia contenente 150 strumenti da fabbro-calderaio-falegname³³. Tra questi si riscontrano tenaglie a becco d'anatra, vari tipi di martello, tra cui quelli da calderaio,

²⁹ Cassinelli 1985, p. 194. Nella collezione si sono riconosciuti molti attrezzi di uso corrente con tenaglie, diversi tipi di martelli, un'incudine, lime, punteruoli e un trapano a volano (v. p. 187).

³⁰ Menis 1990, p. 372.

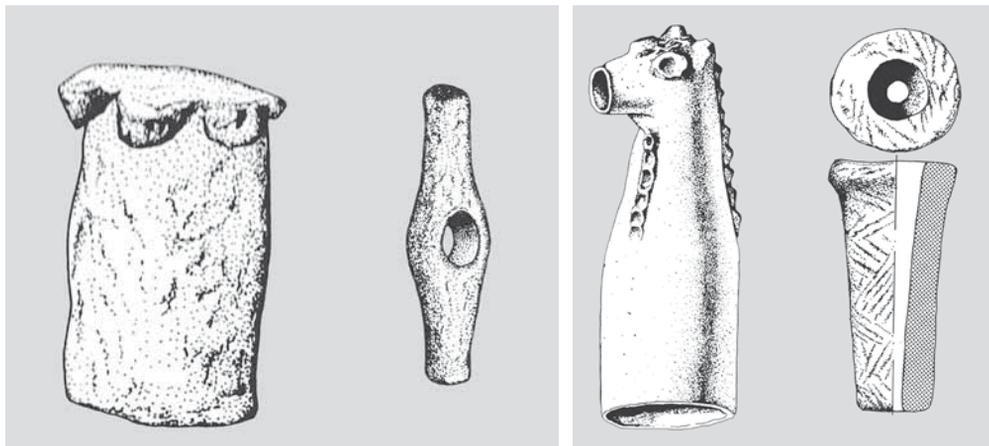
³¹ Così abbiamo interpretato il disegno, ritenendo di aver individuato una conferma piuttosto antica dell'impiego della stessa struttura materiale, sia quale fuoco di forgia per il riscaldamento del metallo nel processo di forgiatura, sia come basso fuoco sul quale di volta in volta si predispone un ambiente protetto per le attività metallurgiche.

³² Arbman 1969, p. 30.

³³ Ivi. I materiali sono conservati allo Statens Historiska Museum di Stoccolma.

cesoie, compasso, lime, una piccola incudine e vari tipi di bulini e punzoni.

Il più significativo documento medievale relativo a una fucina è quello contenuto nel "De Diversis Artibus" di Teofilo. Da questi apprendiamo che l'edificio della fucina deve essere alto e spazioso, con la facciata rivolta ad Est. Ciò, riteniamo, per disporre della luce più favorevole³⁴. La descrizione dettagliata della costruzione di un fuoco di forgia che fornisce Teofilo riguarda una struttura non dissimile da quella mostrata nella raffigurazione della catacomba di Domitilla o nella miniatura del Salterio di Saint-Dié. Si



(Sopra) Incudine cilindrica e martello da calderai.

Tuyère zoomorfa protostorica da Sanski - Bosnia (da Stipcevic) e tuyère coeva da Kalinowka in Russia (da Tylecote).

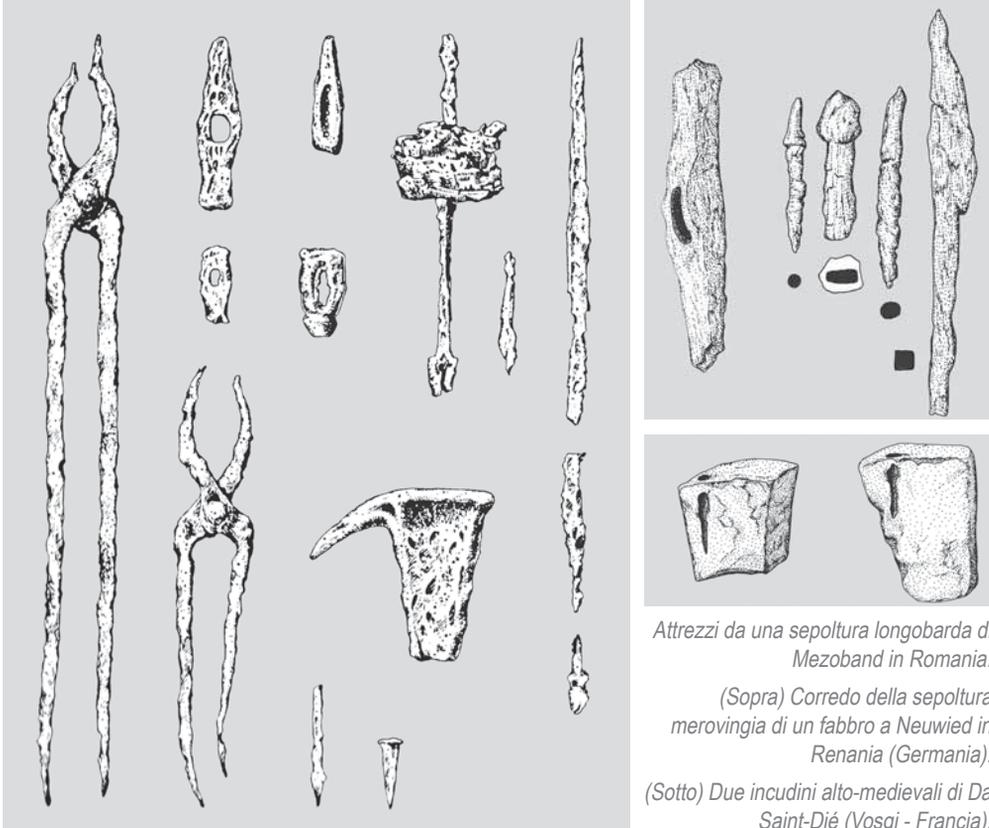
tratta di un ripiano quadrato di argilla ben compressa per percussione, dello spessore di poco meno di tre dita, accostato a una parete di legno alta due piedi e spessa due dita, recante il foro di passaggio della "tuyere" al livello del piano di lavoro. Sia la parete sia il piano, sono ricoperti con un impasto al 50% di argilla e sterco di cavallo, fino a portare il piano allo spessore di quattro dita e a proteggere la parete lignea dall'azione del fuoco³⁵. Il complesso di strutture della fucina di Teofilo comprende il mantice costruito con una pelle intera di capra opportunamente macellata senza tagliarla se non in corrispondenza delle zampe, del collo e delle parti posteriori a cui vengono aggiunti il portavento in ferro ("fistula ferri") e la valvola collocata a tergo (composta da quattro pezzi di legno). Un'immagine di questo tipo di mantice è fornita da Forbes a proposito di un attrezzo impiegato da fabbri zigani. Particolarmente interessante è la descrizione delle incudini, rispetto alle quali apprendiamo dell'esistenza di diversi tipi: quadrato e piatto, piatto e cornuto, quindi quelli rotondi come una mezza mela, di diverse dimensioni, chiamati nodi; infine quelli lunghi e stretti³⁶, con due corna di cui una rotonda e la seconda rastremata. Di rilievo la presenza di incudini emisferiche probabilmente destinate alla produzione di vasi in ferro e in rame. Tra i martelli ("*malleis*") Teofilo distingue molte forme e dimensioni, in particolare, quelli larghi da un lato e stretti dall'altro, e

³⁴ Theophilus 1961, p. 64.

³⁵ Arbman 1969, p. 64.

³⁶ Theophilus 1961, p. 69.

quelli rotondi³⁷, solitamente impiegati nella produzione di vasi. Notevole importanza, nelle fucine di ogni epoca, rivestono le tenaglie, anch'esse distinte in numerosi tipi e dimensioni, da quelle fusorie a manico lungo ("*forcipes fusorii longi*"), a quelle adatte a limare e quelle dette dei carbonai ("*forcipes qui dicuntur carbonarii*"), piegate all'estremità. Il "Diversarum artium" contiene informazioni anche sulle trafilie³⁸, costituite da piastre di ferro rastremate ai margini, con una serie di fori attraverso i quali si costringe il filo a caldo riducendone il diametro. Nello stesso testo sono citati gli scalpelli molati



Attrezzi da una sepoltura longobarda di Mezoband in Romania.

(Sopra) Corredo della sepoltura merovingia di un fabbro a Neuwied in Renania (Germania).

(Sotto) Due incudini alto-medievali di Da Saint-Dié (Vosgi - Francia).

("que limata gracilis in cuspide"), e temprati ("*quod calidum temperatur in aqua*"); gli utensili cesellatori con forme di animali o fiori ("*exprimendas imagines, aues, bestias, sive flores*") e quelli incisori. A completamento dello strumentario sono citate le lime di acciaio di varie forme: «*magnae et mediocres, quadrae, trium costarum et rotundae*».

Una notevole illustrazione di fucina è contenuta nella pagina miniata con soggetti minerari del Graduel di Saint Dié dei primi anni del XVI secolo³⁹, ove è mostrato un fabbro addetto alla forgia e un aiutante in atto di martellare un ferro rovente sull'incudine a forma di parallelepipedo montata su un basamento ligneo. L'alimentazione è fornita da una coppia di azionati da un sistema biella-manovella che insufflano l'aria nella forgia.

³⁷ Theophilus 1961, p. 69.

³⁸ Ivi.

³⁹ Fluck, Bari 1982, p. 43.

I rinvenimenti relativi a fucine medievali sono piuttosto scarsi. Di rilievo il complesso della fucina longobarda di Belmonte di VII - VIII secolo⁴⁰ che ha restituito interessanti evidenze dell'impianto e molto materiale metallico tra cui numerosi attrezzi con una lima, un compasso, un bulino e una grande tenaglia da metallurgista, tipica dello strumento impiegato nell'estrazione del blumo dal basso fuoco al termine del processo di riduzione. Il grande ambiente della fucina collocato all'estremità di una lunga schiera di edifici interni al *castrum*, è diviso internamente da un muro a "L". Al centro della porzio-



I resti della fucina e ferriera longobarda nel castrum di Belmonte in Piemonte (VII - VIII sec.), dove si sono rinvenuti attrezzi tipici dell'atelier da fabbro metallurgista (p. a fronte), oltre a gran quantità di scorie e manufatti in ferro.

ne esterna, parzialmente aperta, i dati di scavo hanno evidenziato i resti di una fuoco di forgia, impiegato anche come basso fuoco a catasta attestato da un grande quantità di scorie, da un fondo di basso fuoco e da un blumo di ferro spugnoso.

Altri rinvenimenti riguardano una tenaglia a becchi ricurvi da Montsegur (Pirenei - Francia), attribuibile al XIII secolo e un'altra con esili ganasce accompagnata da un martello a becchi proveniente da Rugières (Isère - Francia)⁴¹, riferibile a una fucina di XIV secolo. Una notevole incudine istoriata ad altorilievi del XV - XVI secolo⁴², proveniente dall'ambiente italiano è conservata al British Museum (v. p. 192).

Nell'ambiente italiano due siti con occupazioni altomedievali hanno fornito complessi di reperti che arricchiscono le conoscenze sugli antichi atelier per la produzione e la

⁴⁰ Cima, Pantò 2019, p. 81.

⁴¹ Demians-d'Archimbaud 1983, p. 49.

⁴² Si tratta di un manufatto a due becchi, in ferro o forse in acciaio, con il piano di lavoro lungo all'incirca 55 cm.

lavorazione del ferro. Uno di questi si trova a Casteirolo, in Valbormida (Savona) ed è ubicato alla sommità di un modesto colle dalle pendici rocciose molto acclivi, ove diversi sondaggi hanno svelato resti di muri recintivi sul modello dei castellari presenti nel territorio ligure⁴³. Al margine dell'area sommitale confinata con una superficie di circa 50 x 50 m di lato, alla base di un masso basale del muro, è stato individuato un ripostiglio con diverse decine di attrezzi agricoli, tra i quali alcuni robusti vomeri d'aratro a codolo metallico di tipo pannonico e parti in ferro di gioghi del tutto analoghi a quelli rinvenuti



al *castrum* di Belmonte, oltre a una piccola incudine a doppia cuspidata (v. p. 191). Il rinvenimento è ascrivibile all'ambiente di una struttura difensiva di cui due sondaggi estesi hanno posto in luce tratti significativi del muro di cortina⁴⁴.

Un altro contesto di fucina e fonderia, testimoniata da molte scorie, è stato studiato con diverse campagne di scavo alla piana di San Pietro a Pianello Valtidone in Val Trebbia (Piacenza). Qui, in un contesto d'abitato d'altura, si è individuato l'ambiente produttivo da cui provengono diversi manufatti in ferro e due frammenti di piccoli martelli con la punta allungata⁴⁵. Anche in questo contesto sono emersi vomeri a codolo di tipo pannonico e particolari metallici di gioghi, come collari e doppi ganci di chiusura, del tutto simili a quelli di Belmonte e Casteirolo.

Belmonte attrezzi da metallurgista e minatore. (Dall'alto) Compasso, bulino, lima, tenaglie, spiedo, picconi.

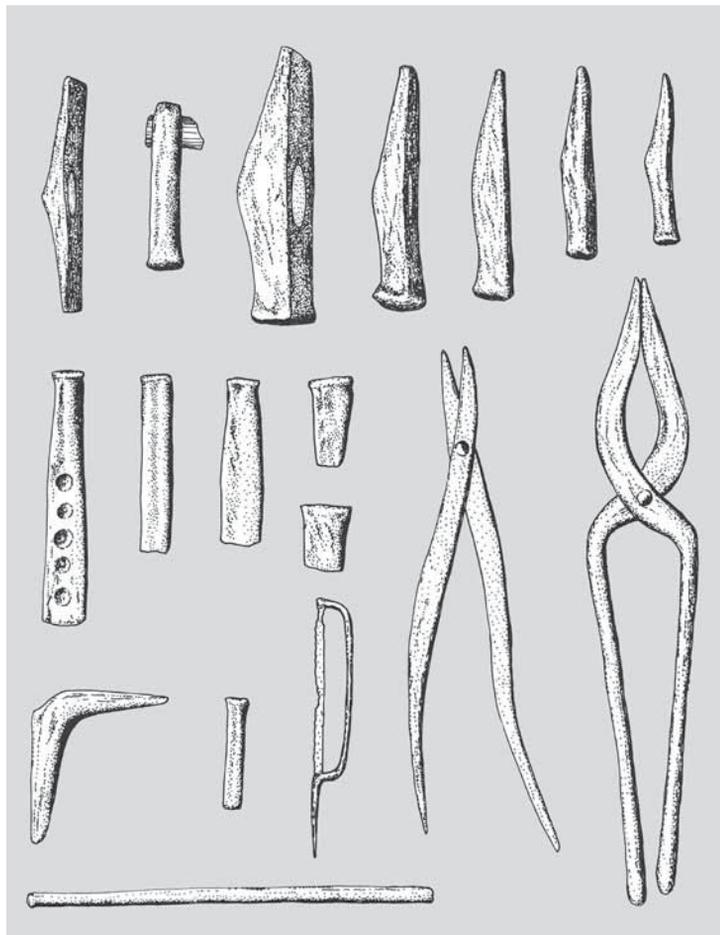
⁴³ Del Lucchese - Ottomano 2013, p. 137.

⁴⁴ Gavagnin 2019, p. 157 e Cima 2019, p. 95.

⁴⁵ Conversi, 2019, p. 163.

La datazione delle occupazioni di questi siti è coerente con gli orizzonti più tardi di Belmonte (VII - VIII secolo) e definisce una sorta di modello insediativo d'altura, di carattere rustico, caratterizzato dalla presenza di attività siderurgiche con produzioni afferenti a sistemi complessi e potenti di aratura a trazione animale, dove la presenza di manufatti in ferro forgiato è significativa.

Una ulteriore conclusione che sembra di poter trarre dai materiali del ripostiglio di Casteirolo, in relazione ai diversi rinvenimenti afferenti ai siti nordici altomedievali e a



quelli di età Classica inquadrabili nel grande ambiente culturale La Tène, illustrati in questo lavoro, riguarda l'incudine. Questo singolare attrezzo è sempre di piccole dimensioni e sembra destinato a supportare le lavorazioni più fini e delicate, in linea con le gesta del mitico fabbro germanico Skallagrímr della Saga di Egil⁴⁶ che condensava i blumi di ferro su una grande roccia. Si può forse concludere che le lavorazioni di forgiatura più pesanti, come quelle della condensazione dei blumi derivanti dai processi di riduzione al basso fuoco e di prima sagomatura a caldo dei manufatti,

Strumenti da fabbro - calderaio - falegname provenienti dal rinvenimento contenuto nella cassetta in legno rinvenuta nel lago di Mästermyr Chest nell'isola di Gotland in Svezia.

avvenissero su solidi basamenti di pietra simili a quello documentato all'atelier di età repubblicana studiato a Scarmagno (v. p. 145).

Un fuoco di forgia costituito da un piano rettangolare di circa 1,5 mq di superficie⁴⁷, molto ben conservato, è stato scavato nel villaggio minerario abbandonato di Bran-

⁴⁶ Einarsson 2003, p. 42.

⁴⁷ Bally Maitre 1989, p. 133.

des-en-Oisans presso Grenoble. Il manufatto è sicuramente anteriore al 1410, data dell'abbandono del villaggio, ma più probabilmente del XIV secolo. Il piano di lavoro, senza particolari infrastrutture era semplicemente costituito da un sottofondo di pietre, residui della combustione e argilla pressata e localmente concotta.

Una struttura analoga è attestata nel villaggio minerario abbandonato di Rocca San Silvestro (Livorno) nell'Italia Centrale, dove il fuoco di forgia era destinato, come nel caso precedente, alla produzione e riparazione degli attrezzi dei minatori⁴⁸.



Il ripostiglio di Casteirolò in Val Bormida con i numerosi attrezzi di ferro forgiato.

(A lato) La piccola incudine contenuta tra i materiali del ripostiglio di Casteirolò..

La struttura materiale delle fucine cinquecentesche appare matura e le successive fasi di sviluppo non coinvolgono ulteriori innovazioni fino al secolo XIX. Non compaiono infatti nuove macchine e l'unica evoluzione riguarda le dimensioni degli impianti.



⁴⁸ Francovich, Parenti 1987, p. 91.

La novità più consistente attiene al maglio. A partire dal XIII secolo sono noti impianti di magli azionati da una ruota idraulica con struttura del tipo terminale e soltanto a partire dal XVIII secolo si registrano magli in batteria con diverse teste battenti (fino a 3), azionate dallo stesso albero motore. Più raramente si riscontrano magli ad azionamento laterale (v. oltre). Strutture di questo genere consentono di realizzare una notevole economia nell'impianto che prevede una sola condotta d'acqua ed un solo gruppo ruota motrice - albero motore, benché richiedano potenze rilevanti. Inoltre, consentono



Frammenti di piccoli martelli da Pianello Valtidone

l'impiego simultaneo di strutture e cinematismi di dimensioni differenti che possono venire attrezzate con utensili adatti a una vasta gamma di lavorazioni⁴⁹. L'aumento delle dimensioni dei magli e la realizzazione di batterie di due o tre macchine, implica una certa sofisticazione nei particolari. Nel corso del XVII - XVIII secolo si conoscono ruote motrici con il mozzo in pietra, che consentono potenze superiori e una maggiore regolarità nella marcia⁵⁰. Analogamente, i montanti litici ("sochi") sono una novità sei-settecentesca, coerente con la crescita delle dimensioni degli impianti⁵¹, destinati a supportare sul piano produttivo un'industria del ferro sempre più esigente, in termini di volumi di prodotto e di qualità. Cambiamenti di qualche rilievo riguardano anche le forge. Pur essendo confermata ancora nel Settecento la struttura essenziale del piano di lavoro quadrato con il muro di protezione dei mantici, o in alternativa del tubo portavento della tromba idroeolica, gli impianti più recenti comprendono grandi camini costruiti in muratura, muniti di ampia cappa per la raccolta e lo smaltimento dei fumi. Generalmente è presente un secondo muro a maggiore protezione dell'area del fuoco; altri ancora sono realizzati in forma di nicchia, chiusi da tre lati con una feritoia per il portavento.

10.2 L'Impiego delle macchine

L'esame della bibliografia tecnica classica, a proposito dell'introduzione dei sistemi meccanizzati nella fucina, non consente di sciogliere una serie di interrogativi che stanno alla base di quello che riteniamo un problema storico, e cioè: quando la mola, il

⁴⁹ Cima 1981, p. 173.

⁵⁰ Cima et al. 1984, p. 523.

⁵¹ Baraldi 1979, p. 129.

mantice e il maglio meccanizzati entrano nel complesso di macchine che compongono la struttura materiale della fucina? Accertato che le trafilerie e i laminatoi mossi dall'energia idraulica sono più recenti, quando anche queste macchine entrano nel complesso di macchinari impiegati nella fucina? Quindi: i magli⁵² e i mantici medievali hanno la stessa struttura tecnologica di quelli largamente diffusi nei secoli XVI - XVIII? Infine, in quale periodo la struttura materiale del maglio a testa d'asino raggiunge le differenti articolazioni tecnologiche (terminale, laterale e frontale, nella terminologia proposta da

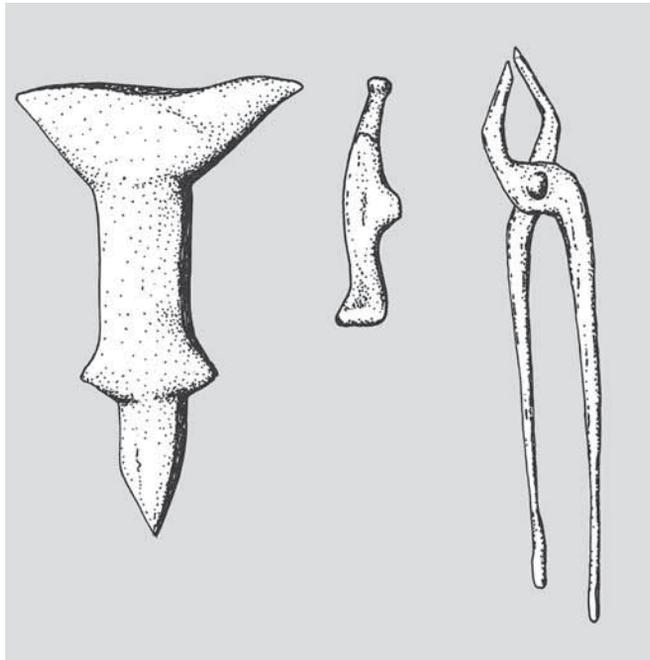


Cassetta in quercia contenente attrezzi vichinghi, parte dei quali sono illustrati nella pagina a fronte rinvenuta sul fondo prosciugato del lago di Mästermyr chest nell'isola di Gotland in Svezia.

(A lato) Attrezzi da fabbro vichinghi.

Bertrand Gille), largamente affermate nei secoli XVIII e XIX, che oggi conosciamo piuttosto bene, grazie ai trattati tecnici dell'epoca e alle evidenze archeologiche ed etnologiche?

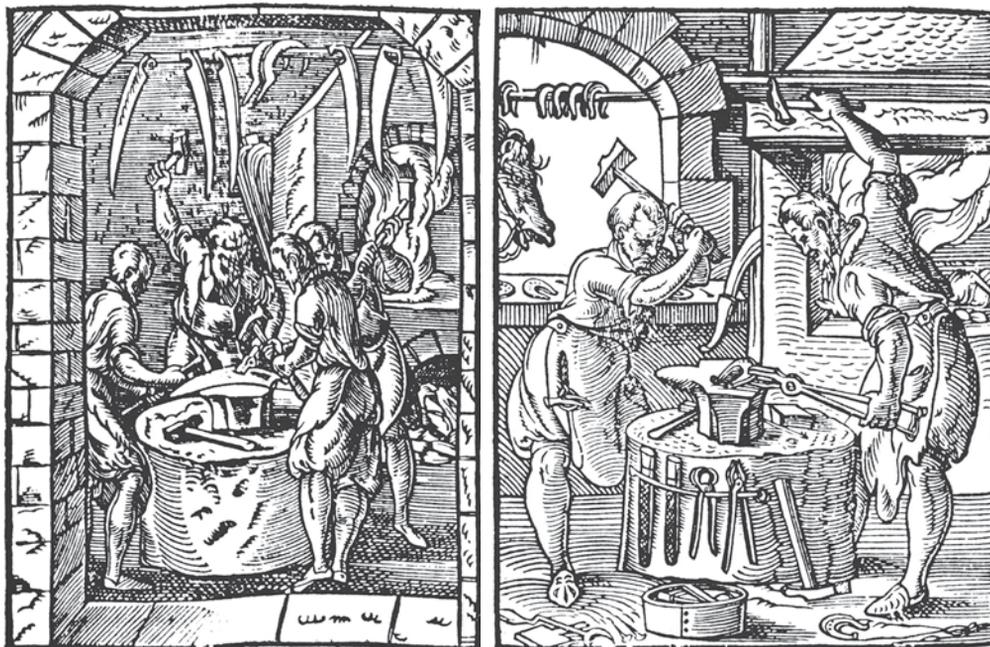
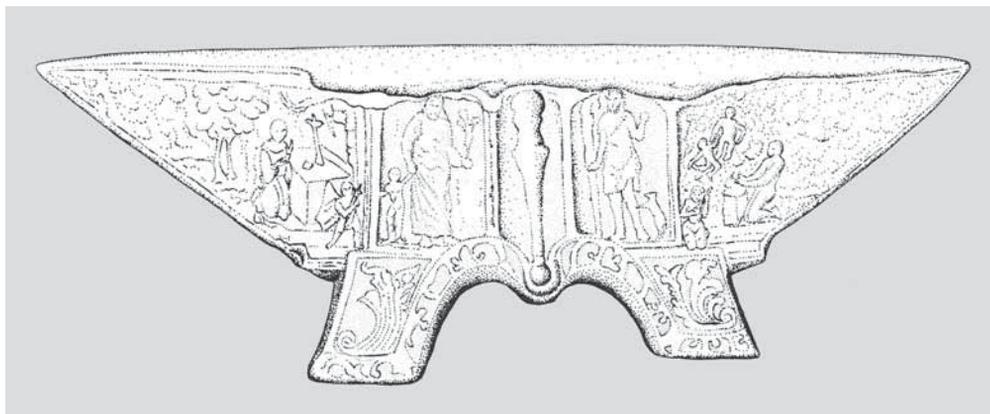
L'esame della documentazione storica disponibile e della bibliografia consente di conoscere con una certa



⁵² Per via della sua maggiore semplicità costruttiva, sembrerebbe del tutto scontato che la strutturazione più antica sia quella del maglio ad azionamento terminale ma mancano le evidenze archeologiche a confermarlo.

10. La fucina di trasformazione

precisione le dinamiche relative ai sei secoli che vanno dal XII al XVII, focalizzandone la completa definizione tecnologica e una buona distribuzione territoriale prima della fine del XIV secolo, anche se, al di là di generiche menzioni nei documenti storici, nessuna testimonianza materiale o descrizione dettagliata soccorre sul piano della ricostruzione delle strutture materiali per gli impianti, ancorché menzionati, soprattutto per i secoli del pieno Medioevo. Unicamente, in analogia alle dinamiche note nei secoli successivi, si può ipotizzare una crescita nelle dimensioni delle strutture e per quanto



Incudine italiana istoriata ad altorilievo attribuibile al tardo-medioevo, di provenienza centro-italica, conservata al British Museum (Londra).

(Sotto) Incisioni cinquecentesche raffiguranti la bottega del costruttore di falci e quella del maniscalco.

attiene ai magli anche l'articolazione con più mazze battenti azionate dallo stesso albero motore.

Il primo testo disponibile che tratta di argomenti tecnici afferenti le fucine è il trattato tecnico del monaco Teofilo del XII secolo: “De Diversis Artibus”, a cui segue un grande vuoto di circa tre secoli per i quali si conoscono soltanto generici trattati di ingegneri che non affrontano direttamente il problema della metallurgia o della lavorazione dei metalli⁵³ né quello del complesso di macchine e meccanismi a essa collegate.

Nel “*Liber tertius*” del trattato di Teofilo, il capitolo IV è dedicato ai mantici e dalla descrizione si evince che nel XII secolo sono ancora diffusi quelli realizzati con tecni-



Miniatura della fucina nel Graduel de la Collégiale de Saint-Dié (Vosgi - Francia), redatto tra il 1505 e il 1515 dove oltre alla forgia è rappresentata la ruota idraulica che aziona i mantici.

che preistoriche, partendo da una pelle intera di animale scuoiato aprendo unicamente il posteriore. Nel capitolo VI intitolato “*De Malleis*”⁵⁴ il monaco descrive i magli a mano, cioè i martelli nelle varie tipologie ma non cita i martinetti.

Sebbene il trattato di Teofilo riguardi prevalentemente la produzione di arredi sacri, possiamo ritenere che in questa fase la meccanizzazione del maglio o martinetto, se non proprio sconosciuta, fosse molto rara; analogamente si può ritenere dei mantici a palmenti lignei che troveranno larga diffusione nei secoli successivi. In linea con i trattati e ricettari antichi Teofilo dedica ampi spazi ai problemi della produzione dei colori, alla loro miscelatura e alla costruzione delle vetrate, mentre gli aspetti metallotecnici si limitano alla produzione di piccoli oggetti con l’impiego di metalli preziosi.

⁵³ A partire dall’immagine mostrata nel Salterio d’Utrecht, l’indagine passa attraverso il “De diversis artibus” di Teofilo, quindi i trattati degli ingegneri tardo-medievali (da Villard de Honnacourt ai rinascimentali italiani), fino a giungere ai tecnici cinquecenteschi (Agricola e Biringuccio).

⁵⁴ Theophilus 1961, p. 85.

Altri dati derivano dalle opere dei tecnici e degli ingegneri rinascimentali. Taccola, Ghiberti e Neroni⁵⁵, nella prima metà del XV secolo, descrivono piuttosto chiaramente una batteria di due mantici azionata dall'energia idraulica, ma non affrontano, neppure indirettamente, il problema del maglio (o martinetto). Leonardo nello stesso periodo descrive in maniera molto lineare una batteria di due mantici, ma quando, nel Codice Atlantico affronta il problema del maglio si perde in virtuosismi cinematici che lo portano a progettare una macchina automatica molto complessa. Date le caratteristiche delle



Miniatura dal Salterio di Utrecht dove si vedono soldati e arcieri che si affrontano e operai addetti alla lucidatura di una spada e molatura facendo uso di un meccanismo a manovella.

tecniche costruttive quattrocentesche, questo sistema aveva scarse possibilità di essere messo in funzione in maniera produttiva. Un maggiore senso pratico a proposito del maglio lo dimostra nel progetto della macchina per costruire le lime. Ciononostante non affronta, nemmeno indirettamente, una descrizione della struttura tecnologica del maglio dei suoi cinematicismi⁵⁶.

Mezzo secolo più tardi, nel "De la Pirotechnia" del 1540 Vannoccio Biringuccio⁵⁷ distingue con una laconica descrizione il martello azionato manualmente dal maglio meccanizzato⁵⁸: «...*et con le mazze a braccia in più pezzi si rompe, et di poi ogni pezzo si riscalda e portasi a l'ingegno del maglio...*». Pur dedicando un intero capitolo alla costruzione dei mantici sia manuali che meccanizzati, egli non ritiene di dover spiegare, neppure a grandi linee, la struttura tecnologica e le modalità costruttive del maglio azionato da un motore idraulico⁵⁹.

Pochi anni dopo il lavoro di Biringuccio, Giorgio Agricola nel "De Re Metallica"⁶⁰

⁵⁵ Gille 1972, p.116.

⁵⁶ Forti 1974, p. 223 e tav. XXX.

⁵⁷ Biringuccio 1540, p. 16v.

⁵⁸ Ivi, p. 16v.

⁵⁹ Biringuccio 1540, p. 109v.

⁶⁰ Agricola 1563, p. 365.

cita ripetutamente il maglio meccanizzato, dandone anche due immagini parzialmente incomplete. Le descrizioni che fornisce sono estremamente sommarie: «...*si mettesse a l'ancudine, e col gran maglio di ferro si percotesse da denti del fuso che volta la ruota...*» e «...*a ciò il maglio da la ruota alzato et abbassato...*»⁶¹. Anche questo autore, pur dedicando numerosi capitoli ai vari meccanismi di fucina, tra i quali i mantici (libro VIII), non dedica alcuna descrizione particolare al maglio. Maggiore aiuto deriva dalle immagini (tutte nel libro dedicato al ferro), che mostrano magli a testa d'asino azionati lateralmente: dello stesso tipo di quelli che il De Saint Ange nel XIX secolo descriverà unitamente ad una fucina “alla tedesca”⁶².

Nel 1565 Olaus Magnus offre un disegno schematico molto chiaro contenente vari impianti di maglio meccanizzato che potrebbero essere del tipo terminale, e di un impianto di mantici collegato ad un grande forno da metallurgia⁶³.

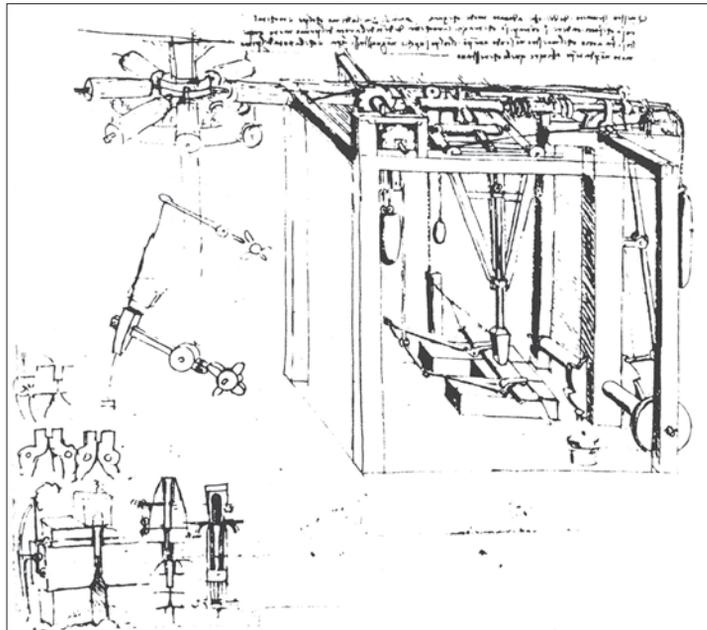


Tavola dal Codice Atlantico di Leonardo dove è illustrato in maniera sintetica il principio di funzionamento del maglio a testa d'asino con azionamento terminale (al centro sulla sinistra), oltre a una complicata macchina per la forgiatura basata sulla caduta libera di una pesante mazza battente che verrà introdotta nell'Ottocento con la denominazione di "berta".

Negli anni 1609 - 1610 Giovanni Da Lezze, nel Catastico Bresciano, pur fornendo una descrizione estremamente circostanziata del processo produttivo del ferro bresciano, non considera la struttura del maglio, così come quella degli altri elementi tecnologici che compongono il processo⁶⁴.

Nella seconda metà dello stesso secolo il Della Fratta⁶⁵, nel suo trattato “Pratica Minerale” parimenti agli altri autori, non descrive il maglio. L'unico riferimento si trova nel capitolo XXIV “Della fusione della vena del ferro”, dove si limita a scrivere: «...*il maestro poi la strascina al maglio da acqua...*». Nell'immagine della ferriera accanto al basso fuoco, mostra un disegno di maglio terminale, con i montanti in legno. Questo autore,

⁶¹ Agricola 1563, p. 364.

⁶² De Saint Ange 1835, p. 22.

⁶³ Tylecote 1985, p. 171. (v. anche p.143 in questo volume).

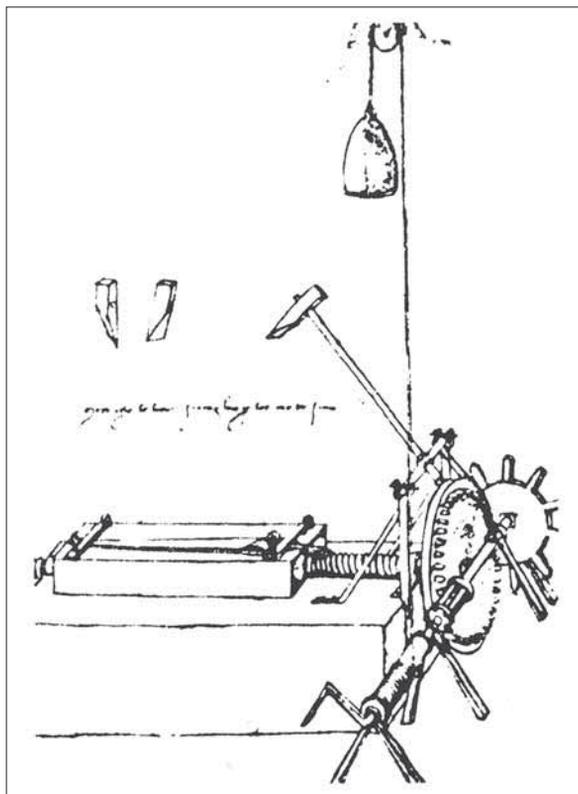
⁶⁴ Da Lezze 1973, p. 598.

⁶⁵ Della Fratta Montalbano 1978, p. 145.

a differenza dei suoi predecessori, nel sistema tecnologico della fucina o ferriera incentrata sul basso fuoco a catasta, non descrive i mantici, bensì la tromba idroeolica, comparsa nell'ambiente tecnologico italiano nel corso del XVI secolo.

Un'edizione del 1678 del "De la Pirotechnia" del Biringuccio riporta un'illustrazione di un maglio a testa d'asino con azionamento terminale⁶⁶.

Ancora a proposito delle macchine da fucina, Biringuccio, sin dalla prima edizione del suo trattato, descrive e mostra una immagine particolarmente chiara di trafileria



per metalli azionata dall'energia idraulica e funzionante con il sistema biella - manovella ("... si fa uno edificio a acqua con una ruota dove in testa del biligo è un ferro torto...")⁶⁷. Pure non eccessivamente diffusa questa macchina compare con una certa frequenza nelle fucine medievali come evoluzione dell'antica trafila azionata con trazione manuale per la produzione del filo di ferro.

10.2.1 La comparsa dell'azionamento idraulico

Le prime tracce dell'azionamento idraulico di macchine impiegate nella fucina compaiono intorno al secolo XI e si riferiscono principalmente alle mole impiegate per l'affilatura degli strumenti e delle armi da taglio. Si tratta di macchine molto semplici costituite

Maglietto a contrappeso per la fabbricazione di lime dal Codice Atlantico.

da un asse, supportato alle estremità, sul quale vengono montate sia la ruota motrice, sia la mola⁶⁸.

Il grande impulso produttivo derivante dall'introduzione nelle fucine dell'azionamento idraulico riguarda la complessa macchina del maglio a testa d'asino o martinetto. Questa si sviluppa e si afferma nei tre secoli compresi tra il XII e il XIV.

Nel XII secolo il sistema non è ancora diffuso a sufficienza affinché Teofilo ne parli sebbene non sia del tutto sconosciuto. Come discusso in precedenza, nel XV e XVI secolo, quando gli ingegneri rinascimentali prima e i tecnici metallurgisti poi, affrontano

⁶⁶ Pelet 1978, p. 38.

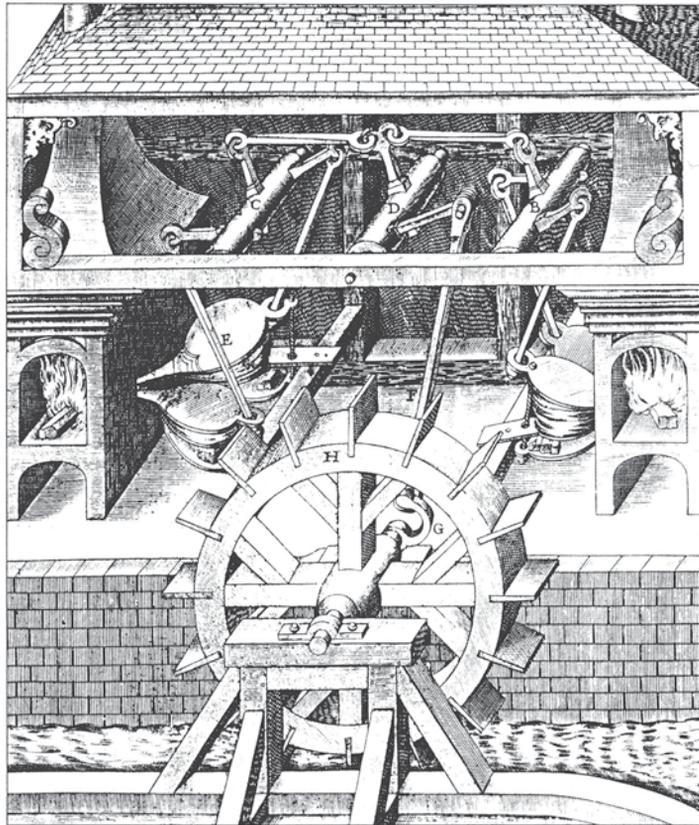
⁶⁷ Biringuccio 1540, p. 140v.

⁶⁸ Pelet 1978, p. 53.

i problemi legati alle tecniche metallurgiche e alle fucine, la tecnologia del maglio è decisamente matura e consolidata, al punto che una descrizione dettagliata è ritenuta priva di interesse, mentre quella dei mantici probabilmente richiede ancora perfezionamenti, soprattutto per sostenere la sofisticazione dei forni da metallurgia.

Bertrand Gille, pure con un supporto documentario piuttosto labile propone che il maglio mosso dalla ruota idraulica sia di provenienza mediterranea⁶⁹, forse orientale, sebbene impianti piuttosto antichi siano noti anche nell'Europa continentale. Egli cita un documento del 1116 riguardante la trasformazione di un martinetto da ferro in un mulino da parte dei monaci dell'abbazia di Notre Dame d'Issoudum a Sud-Ovest di Parigi⁷⁰. Qualora il documento sia attendibile si tratterebbe di una delle prime notizie di maglio ad azionamento idraulico francese chiaramente identificato.

Quella che sembra la prima testimonianza europea di macchina da fucina mossa dall'energia idraulica è contenuta nel cartolario dell'abbazia di Saint-Hugues nel Delfinato, ove nel 739 è già presente una fucina collocata lungo il fiume Bourbre⁷¹.



Fucina con due fuochi di forgia alimentati da coppie di mantici meccanizzati azionati da una grande ruota idraulica dal trattato "Le diverse et artificiose macchine" di Agostino Ramelli del 1588.

La presenza di fucine o ferriere azionate dall'energia idraulica pare aver lasciato tracce anche nella toponomastica. Un documento monastico databile nel periodo compreso tra il 1006 e il 1028, è riferito ad un villaggio denominato Smidimulni nell'Oberpfalz tedesco, in cui è chiara la radice "smith" (fabbro) e il suffisso "mulni" (mulino)⁷².

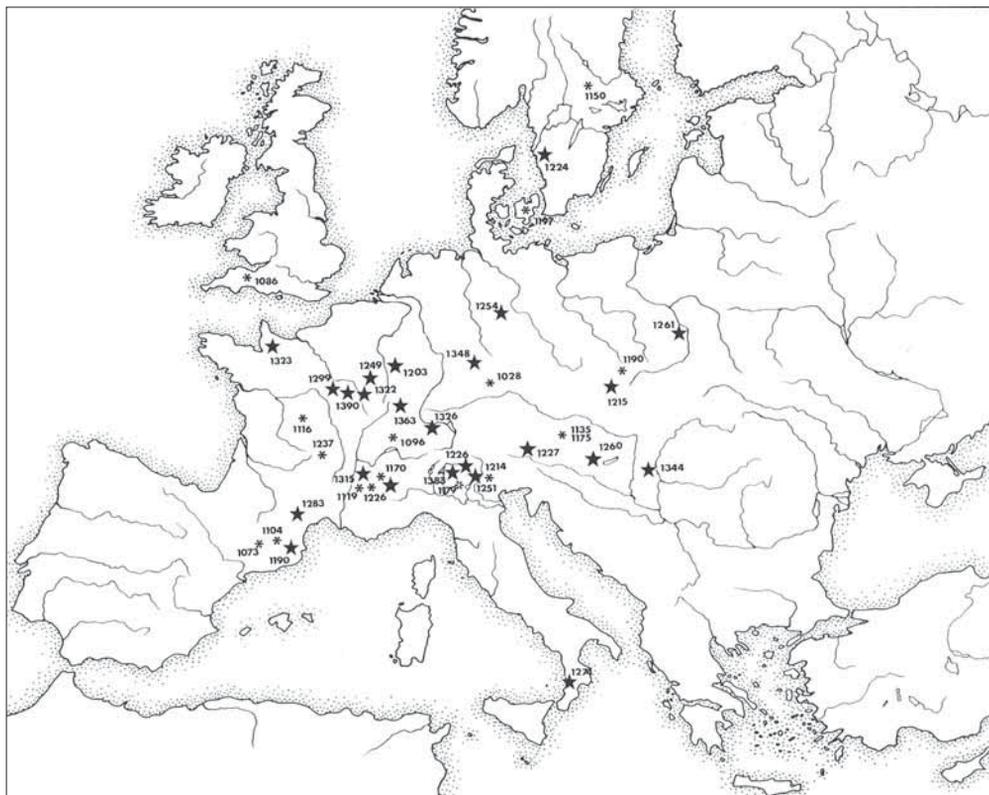
⁶⁹ Gille 1962, p. 244.

⁷⁰ Ivi, p. 245.

⁷¹ Pelet 1978, p. 54.

⁷² Ivi, p. 65.

Terry Reynolds⁷³ propone che la prima notizia di un impianto di maglio meccanizzato sia ascrivibile alla Stiria, ove un documento del 1135 tra le proprietà di un monastero di Admont cita «*molendinum unum et stanf unum*»⁷⁴. Un analogo documento della stessa area, nel 1175 cita un mulino azionante il maglio (*stamp* oppure *stanf*). Nello stesso articolo sono riportate le citazioni di Heckenast a proposito di magli e mantici azionati da ruote idrauliche⁷⁵, in Carinzia, prima del 1227 e 1262; così per l'Ungheria occidentale, intorno al 1260. Nelle vicine Alpi italiane, a Bergamo, nel 1179, un documento riferisce



Distribuzione dei più antichi impianti di “mulino da ferro” noti in Europa nell’intervallo dei secoli XI-XIV. Le stelle indicato le segnalazioni certe e gli asterischi quelli desunti per via indiretta.

di un canale di forno da ferro, ove non è chiaro se l’energia idraulica fosse destinata all’azionamento dei mantici o del maglio⁷⁶. Nel 1214 un altro documento cita la “rota” in un forno da ferro. Analoghi riferimenti derivano da un documento di Bormio⁷⁷ nelle Alpi Centrali del 1226 e da un altro della stessa area del 1251.

Al margine occidentale delle Alpi Reynolds riferisce di un documento del 1119 che riporta un “mulin martin” (mulino a martinetto)⁷⁸.

⁷³ Reynolds 1985, p. 61.

⁷⁴ Forbes 1962, p. 74.

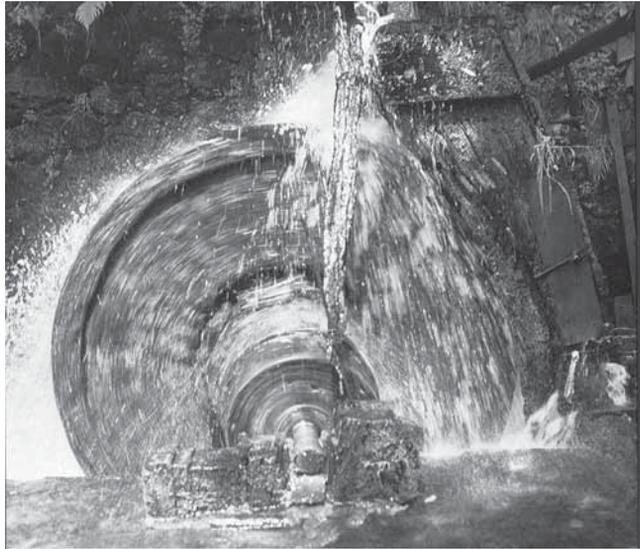
⁷⁵ Reynolds 1985, p. 64.

⁷⁶ Ivi.

⁷⁷ Ivi.

⁷⁸ Reynolds 1985, p. 64.

Alla Certosa di Saint Hugon, nel 1170, sono citate delle fucine lungo il fiume Bens. Altre fucine da ferro connesse a corsi d'acqua sono citate vicino Allmond nel Delfinato, nel 1226, ma non si conoscono dettagli circa le macchine impiegate. In ogni caso, la localizzazione lungo un corso d'acqua induce a presumere l'impiego della meccanizzazione mediante la ruota idraulica. Nel 1203 gli stessi monaci di Saint Hugon sono proprietari di un mulino da ferro a Troyes in Champagne e nel 1249 è registrato un donativo di un mulino da ferro a Bar sur Seine. Nello stesso anno è citato un mulino per macinare ferro a Nogent sur Seine⁷⁹. Nel 1237 a Boussague, nel Massiccio Centrale, è citato un impianto probabilmente attribuibile ad un martinetto⁸⁰. Nel 1283 i signori di Escoussens (Tarn) fanno costruire due "mulini a battere il ferro" nello stesso centro di Escoussens e nella Montagna Nera, mentre nel 1299 un "molendinum ad ferrum" a Villeneuve sur Yonne risulta di proprietà reale⁸¹.



Ruota idraulica del tipo "per di sopra" il cui impianto è databile alla fine del XIX secolo, azionante un potente maglio (Bienno - Brescia).

Ancora Reynolds in concordanza con Gille⁸², analizzando il problema della comparsa e della diffusione del maglio meccanizzato, propone che uno dei primi impianti accertati nel Nord-Europa si trovi nel villaggio svedese di Toaker, compreso nei possedimenti dell'abbazia cistercense danese di Söro. Il documento è del 1224 e appare piuttosto chiaro: «*de molendino ubi fabricatur ferrum*», sebbene non consenta di sciogliere il dilemma se l'azionamento idraulico riguardi il mantice o il maglio. Un altro impianto, sempre riferito all'abbazia di Söro, è citato nel 1197 in Danimarca⁸³.

In Svezia, nell'abbazia di Kirkstall, vicino a Leeds, i benedettini dispongono di un mulino da ferro, citato in documenti del 1150 e 1160⁸⁴.

Gli stessi autori riportano in forma dubitativa notizie di impianti in Catalogna nell'intervallo di tempo compreso tra il 1104 e il 1155, tratte da documenti non conservati. Un altro documento del 1173 riferisce di un "molinum fornacinum" nella stessa area⁸⁵.

⁷⁹ Gille 1960, p. 20.

⁸⁰ Boulin 1960, p. 24.

⁸¹ Bautier 1960, p. 13.

⁸² Gille 1970, p. 149.

⁸³ Boulin 1960, p. 25.

⁸⁴ Reynolds 1985, p. 63.

⁸⁵ Ivi, p. 63.

Ancora Terry Reynolds riferisce di un «*molendino, quod ibidem materiam ferri massam in quam sive metallum molit*», a Rudnyki nella Polonia meridionale, nel 1261.

In Gran Bretagna, il Domesday Book del 1086, riporta tre località intorno a Lexworthy, ove vengono pagati i censi in ferro, di cui già si è detto ma non riporta notizie dirette sulla presenza di sistemi meccanizzati, sebbene registri ruote ad acqua⁸⁶.

Tracce incerte di un mulino da ferro in Slesia sono riferite al 1190, mentre nel 1215 sono molto esplicite per una struttura della zona di Olmütz, dove è citato un «*molendina*



Forgia e maglio meccanizzato del tipo cosiddetto "alla tedesca" ad azionamento laterale dal De Re Metallica, in un contesto di fucina, dove si vede un addetto alla forgia. A. Catino; B. Mantici, C. Tenaglie; D. Maglio; E. Rio.

quae vulgo Hutte dicuntur ad ferri fodina spectantia». Strutture analoghe sono note nella Ruhr nel 1226-28, nel 1254 nell'Hunter-Harz e ancora, nel 1348 in Turingia e nel 1363 nel Wurtemberg⁸⁷. Un "mulino da ferro" è citato anche in Calabria nel 1274⁸⁸. A Stitnik in Slovacchia, nel 1344, si ha notizia di un maglio idraulico «*fabrilis domibus qui vulgo hamur vocant*»⁸⁹. Impianti di magli con mole meccanizzate («*unum martinetum et unam molam ... ad molando secures, enses, cutellos...*») e anche «*ad molandum gladia ...*») sono noti nel Giura Vodese nel XIV e XV secolo⁹⁰. Si tratta di Beauvillars nel 1458, Clarens-sur-Vich nel 1457, Vallorbe-de-Vivier nel 1488, Vallorbe-de-Ville nel 1495 e Orbe nel 1494 e 1497. Il motore della diffusione del "mulino da ferro" nell'Europa medievale appare inequivocabilmente l'attività dei monaci benedettini⁹¹ che trasformano i monasteri in centri d'irraggiamento tecnologico d'eccezionale attività.

Lo sviluppo del maglio a testa d'asino è probabilmente coerente con

⁸⁶ Reynolds 1985, p.63.

⁸⁷ Boulin 1960, p. 25.

⁸⁸ Ivi, p.78.

⁸⁹ Reynolds 1985, p. 64.

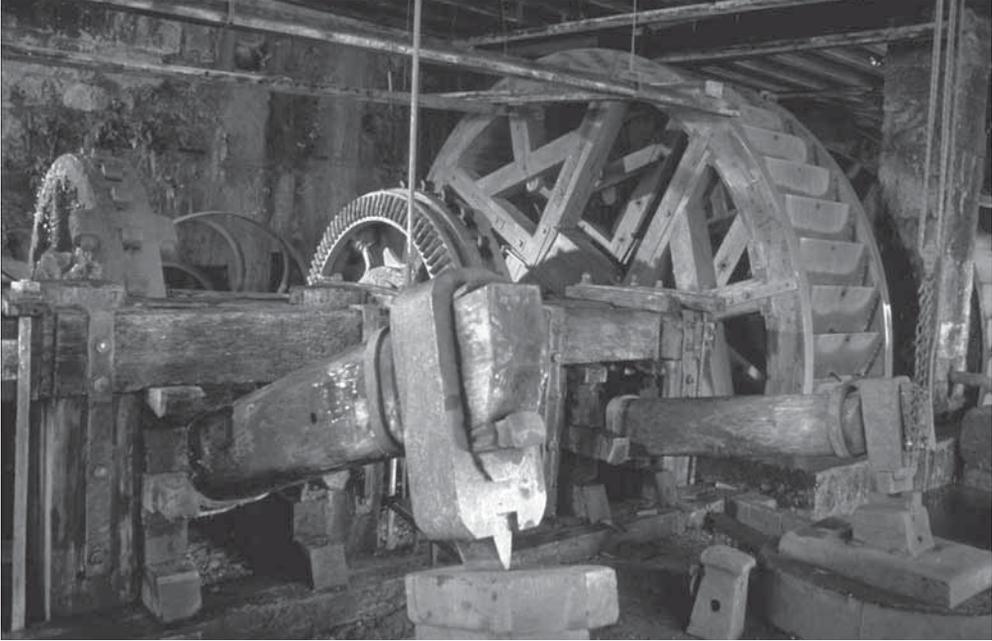
⁹⁰ Pelet 1970, p. 52.

⁹¹ Gille 1985, p. 151.

quello dei mantici mossi dall'energia idraulica, come suggerisce Forbes⁹², sebbene questi ultimi sembrano comparire sulla scena europea con qualche decennio di anticipo.

Altri indizi molto antichi, sebbene labili, su impianti meccanizzati impiegati nella lavorazione del ferro riguardano un donativo del 1096 al convento di Romanmôtier di un mulino del fabbro Arenbertus⁹³.

Il maglio meccanizzato o martinetto è sicuramente piuttosto diffuso in Europa già alla fine del XIII secolo, infatti il delfino Giovanni II nel 1315 lo cita nel privilegio concesso



Batteria ottocentesca di magli a testa d'asino di Nans-sous-Sainte-Anne, nella strutturazione terminale con il grande motore idraulico in legno. (Fotografia Musée des Techniques et Culture Comptoise).

ai cittadini di Allevard, come elemento normale della struttura produttiva metallurgica⁹⁴.

L'impianto di mole mosse dall'energia idraulica pare precedere quello del maglio e del mantice. Il cartolario della siderurgia francese pubblicato da Bertrand Gille⁹⁵ cita 12 mulini da ferro nel secolo compreso tra il 1195 e il 1292, nelle seguenti località: Beauvais nel 1195 e 1257, Saint-Galmier nel 1292, Verneuil-sur-Avre nel 1291, Evreux nel 1278, nell'abbazia di Barbeau nel 1249 e a Nogent-sur-Seine nel 1267. Tre di questi si riferiscono a macchine indeterminate, otto sono chiaramente delle mole ("*molendinum ad cultellos*", "*molendinum ad secures*"). In Normandia, un contratto del 1323⁹⁶, riguarda l'impianto di una forgia con meccanismi idraulici. In un atto di cessione stipulato a Vobarno (Brescia) nel 1383 la fucina viene descritta come: «*unius foxine a ferro cum*

⁹² Forbes 1962, p. 70.

⁹³ Pelet 1978, p. 63.

⁹⁴ Boulin 1960, p. 31.

⁹⁵ Gille 1970, p. 151.

⁹⁶ Girardot 1970, p. 31.

*tecto et eddificiis super existentibus et cum vaso aque ...»*⁹⁷. La presenza del “vaso aque”, inteso come la chiusa d’invaso dei canali di alimentazione delle ruote idrauliche, consente di confermare la presenza di apparati meccanizzati pur non citando direttamente magli, mantici o altre macchine azionate da ruote idrauliche. Nel 1390 i monaci benedettini impiantano una forgia impiegante l’energia idraulica a Saint Arnould de Metz in Lorena e un’altra forgia a Bar viene fatta costruire dal conte nel 1323⁹⁸.

L’ipotesi di affermazione medievale del maglio coincide con lo sviluppo del mulino



Ruota idraulica dell’impianto ottocentesco di fucina da ferro (molendinum ferri) ancora discretamente conservato negli anni Ottanta del XX secolo. La struttura non è dissimile dagli impianti medievali. (Canischio Torino).

idraulico che Le Goff colloca tra l’XI e il XIV secolo⁹⁹, benché questa macchina sia nota, nella sua definizione strutturale di “motore”, sin dal mondo romano. La scarsa evoluzione tecnologica della civiltà altomedievale aveva fatto perdere quasi completamente la cultura tecnica necessaria per la costruzione e la manutenzione degli impianti. Una conferma deriva dalla cronaca di Saint Bertin nel X secolo ove viene citata come “mirabilia” la costruzione di un mulino ad acqua da parte dell’abate¹⁰⁰.

La diffusione capillare del maglio e dei sistemi meccanizzati si realizza piuttosto tardi e soltanto nel XIV secolo le fucine meccanizzate risultano piuttosto diffuse.

Sulla base delle evidenze materiali osservate in diversi contesti europei si può ritenere che il maglio medievale fosse una macchina piuttosto piccola e poco potente. È la grande spinta evolutiva avviata nella seconda metà del XVI secolo a introdurre nelle

⁹⁷ Putelli n.d., p. 37.

⁹⁸ Girardot 1970, p. 10 e Boulin 1960, p. 31.

⁹⁹ Le Goff 1981, p. 214.

¹⁰⁰ Ivi, p. 84.

fucine i magli, talora in batterie di due o tre battenti, azionati da grandi ruote motrici con mozzi in pietra funzionanti da potenti volani capaci di regolarizzare il moto.

10.2.2 Magli e mantici meccanizzati

I documenti iconografici a nostra disposizione confermano la presenza di magli del tipo terminale nelle fucine italiane del XV secolo. Un'idea della struttura materiale è fornita dai disegni di Leonardo e dagli schizzi di Filarete. Una testimonianza documen-



La batteria di magli a testa d'asino settecentesca per la produzione di attrezzi agricoli in ferro azionata dal motore idraulico mostrato nella fotografia della pagina a fronte.

tale di rilievo è contenuta negli estimi degli impianti genovesi della seconda metà del secolo¹⁰¹. Nella stessa epoca risultano presenti nell'ambiente tedesco i magli ad azionamento laterale come paiono dimostrare le tavole illustrative del "De Re Metallica"¹⁰². Le immagini si riferiscono con chiarezza a macchine piuttosto evolute, ma con scarsa potenza di percussione, anche se consentono un deciso incremento produttivo.

A partire dal XVII secolo i magli divengono via via più potenti. Come già osservato nascono le macchine in batteria, quindi si ricercano maggiori potenze alimentando i motori con salti d'acqua più grandi e copiosi, dotate di pesantissimi mozzi in pietra, capaci di muovere ruote con diametri molto consistenti. Parallelamente si affinano le tecniche costruttive che tendono a rimuovere soprattutto gli attriti nei meccanismi in movimento per elevare il rendimento delle macchine. Nel corso del XVIII e del XIX secolo sono note delle macchine costruite con cura e precisione particolari, come mostrano i disegni del De Saint Ange. Nel secolo XIX faranno la loro comparsa dei potenti

¹⁰¹ Forbes 1962, p. 70.

¹⁰² Agricola 1678, p. 365.

magli ad azionamento frontale, di produzione inglese, come mostra ancora lo stesso trattato "Metallurgie Pratique du Fer"¹⁰³ e le "berte", già teorizzate da Leonardo, basate sul principio della caduta libera di una pesante mazza sollevata mediante l'avvolgimento di una robusta cinghia su una puleggia.

Un'altra macchina ben diffusa nelle fucine medievali è il mantice meccanizzato, di cui si riscontrano due versioni: quella azionata a camme e quella con sistema biella - manovella. La crucialità dei mantici (poi delle trombe idroeoliche) discende dall'evoluzione della struttura tecnologica e delle dimensioni dei forni da metallurgia, che dura per tutto il Medioevo e l'età Moderna. La ricerca di maggiore efficacia e potenza nei sistemi di ventilazione, così come la necessità di disporre flussi continui, accompagna la storia dei forni e l'evoluzione della metallurgia. Ciò spiega il grande interesse per questa macchina, nei secoli XV e XVI. Viceversa il maglio pare raggiungere precocemente una strutturazione materiale abbastanza consolidata e definitiva piuttosto precocemente, con validi risultati tecnico-operativi. Di qui forse l'assenza, nei trattati tecnici quattro-cinquecenteschi, di descrizioni dettagliate relative a questa macchina.

10.3 La struttura materiale del maglio

Il maglio è la macchina medievale che meglio rappresenta il progresso tecnologico manifestatosi dopo il Mille. Strutturalmente si tratta di un sistema meccanico complesso che richiede una tecnica costruttiva articolata e precisa. Insieme con il forno a manica, è il grande protagonista dell'evoluzione medievale della siderurgia. Le strutture materiali dei magli, quali risultano dalle fonti tardo-medievali¹⁰⁴ sono del tipo terminale e laterale. la variante frontale compare nell'ambiente tecnologico europeo soltanto tardivamente¹⁰⁵. La funzione di questa macchina è quella di sagomare plasticamente delle forme mediante successivi colpi di mazza, a partire da un massello riscaldato alla forgia secondo una tecnica detta "scapolatura".

10.3.1 Il maglio terminale

Consta di un incastellatura solitamente realizzata mediante due pesanti montanti litici o più raramente lignei¹⁰⁶, opportunamente sagomati, collegati da due coppie di traverse, la prima situata in alto e la seconda a livello del suolo. Tra i due montanti viene collocata l'asta portante la mazza battente fulcrata secondo lo schema della leva di primo genere, sull'incastellatura rigida fornita dai montanti. Il braccio minore (misurato sull'asta o manico) è quello posto dal lato dell'azionamento realizzato con una serie di camme poste sull'albero motore collocato ortogonalmente all'asta. Sul braccio

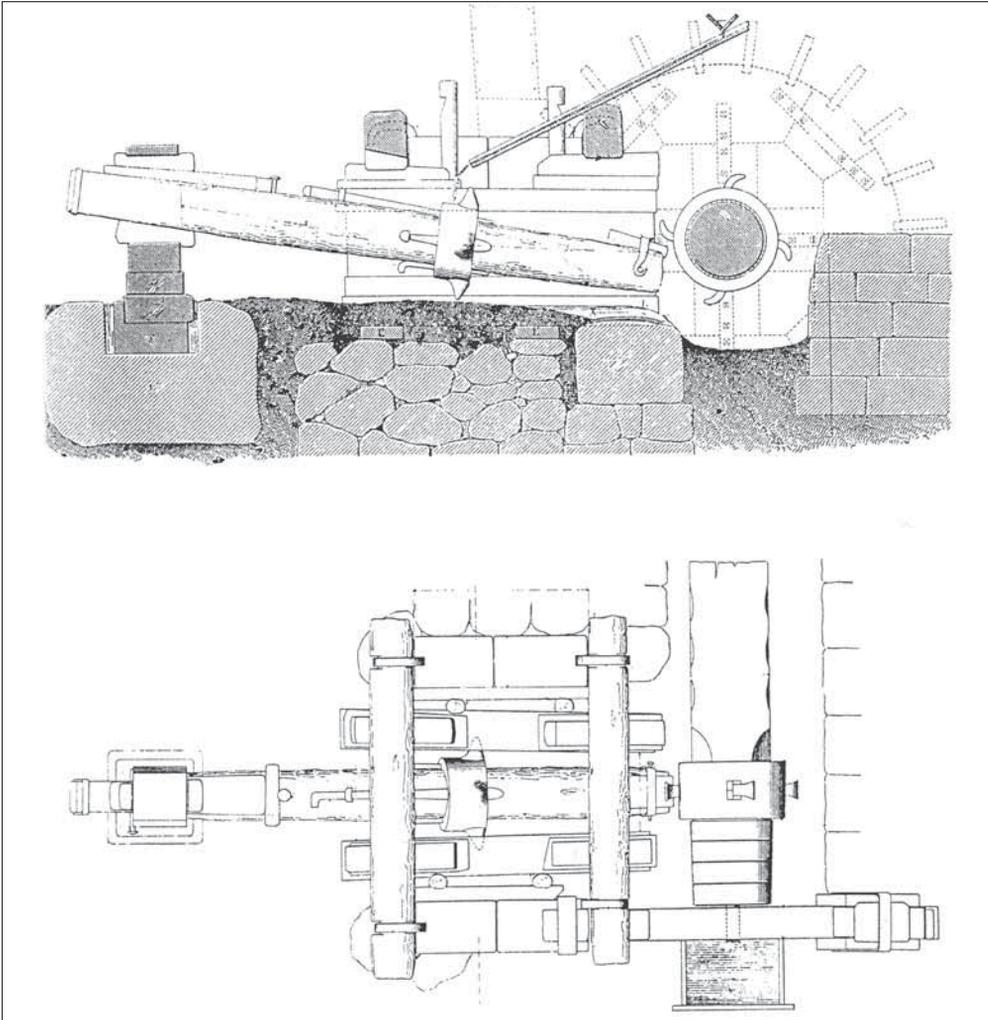
¹⁰³ De Saint Ange 183538 e tav, 7 - 9.

¹⁰⁴ Sostanzialmente dai trattati di Agricola e Olaus Magnus. Mancano in generale dati su questo argomento relativamente all'indagine archeologica.

¹⁰⁵ De Saint Ange 1835, p.27 - tav. 17.

¹⁰⁶ La scelta dei materiali dipende spesso anche dalle caratteristiche del substrato litologico della località, che talora non consente di reperire, entro un raggio adeguato, i materiali da costruzione adatti.

maggiore è calzata la pesante mazza battente. Le camme montate sull'albero motore interferiscono con l'estremità dell'asta, costringendo la potente mazza al sollevamento brusco fino a scagliarla sul pavimento ove si trova alloggiato un pesante masso o una molla metallica che accentua il rimbalzo aumentando la potenza di caduta e quindi di percussione. L'incudine si trova alloggiata sul basamento rigido offerto da un grande blocco di solida roccia, sepolto nel terreno di fronte alla mazza battente che costituisce il principale elemento d'irrigidimento della struttura.

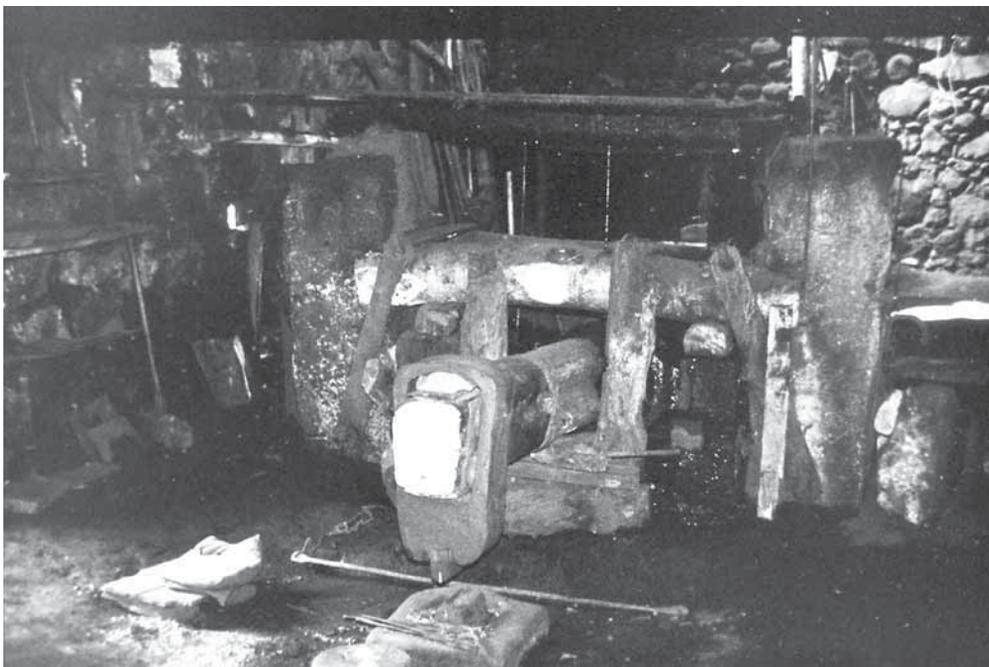


Pianta e sezione dell'impianto ottocentesco di un maglio ad azionamento terminale dal trattato Métallurgie Pratique du Fer di Walter De Saint Ange edito nel 1835.

10.3.2 Il maglio laterale

Il maglio laterale offre forti analogie con il primo. Le differenze più consistenti riguardano l'incastellatura, di solito interamente lignea e la posizione dell'albero motore, parallela o sub-parallela, rispetto all'asta oscillante. Il sollevamento è realizzato mediante

10. La fucina di trasformazione



Il potente maglio ad azionamento terminale della fucina Comensoli a Bienno (Valcamonica - Lombardia) rimasto in attività fino all'ultimo decennio del XX secolo. Si tratta di una delle macchine più potenti mai realizzate con questo tipo di tecnologia.

(Sotto) Canale di gronda pensile per l'alimentazione di una delle numerose fucine di Bienno. In basso a destra la ruota del maglio con il cuscinetto in bronzo alloggiato in una sede lignea contenuta nel masso incavato e al centro il "ruotino" della mola.



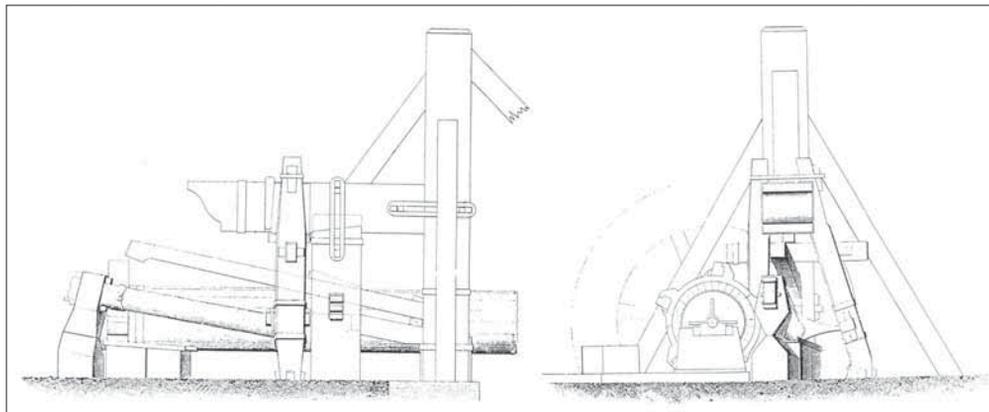
Resti dell'impianto di una batteria di magli a testa d'asino del tipo terminale a Lessolo (Piemonte) lungo il vallone dell'Assa dove si aprono gli antichi cavi delle miniere di ferro. Lo scatto riprende i pesanti montanti litici dalla sede dell'albero motore di cui si vede il foro di passaggio. In testa la scritta incisa sul primo montante con il nome del proprietario e la data 1774. Al centro il varco dell'albero motore.

(Sotto) L'albero motore di una batteria a tre magli abbandonata e smantellata, ancora equipaggiata con le pesanti corone in ghisa di alloggiamento delle camme.

un ordine di camme che interferiscono con l'asta del maglio e la scagliano contro una robusta molla lignea fissata nella parte alta dell'incastellatura, che la costringe al rimbalzo aumentando la potenza di percussione sull'incudine¹⁰⁷.

10.3.3 Il maglio frontale

La macchina entra tardivamente nei sistemi impiantati nelle fucine ed è solitamente un impianto molto potente che consta di un grande macchinario con le singole compo-



Maglio ad azionamento laterale dai rilievi contenuti nel trattato *Métallurgie Pratique du Fer* di Walter De Saint Ange del 1835.

nenti portanti interamente costruite in ghisa fusa. Il principio di funzionamento si basa su un movimento alternativo in grado di sfruttare l'enorme peso della mazza battente che cade per semplice gravità dopo il sollevamento a opera di un pesante volano a camme, anch'esso metallico, mosso da una potente ruota idraulica o, più recentemente da un motore elettrico (v. p. 210).

Analisi dei documenti

Dati storici di particolare rilievo che consentono di comprendere nel dettaglio la struttura materiale dei magli tardo-medievali sono contenuti in un mazzo di estimi notarili genovesi¹⁰⁸. Già nel primo gruppo (1467-1492), il maglio appare ampiamente diffuso in tutte le fucine da ferro citate.

Negli elenchi delle attrezzature scaturisce un interessante quadro di particolari che consentono di riconoscere la struttura materiale del maglio terminale che, almeno a grandi linee, risulta nella tipica strutturazione degli impianti moderni. Dove più documenti genovesi sottolineano: «*mallium cum azarino et aliis suis munimentis pro laborando*»¹⁰⁹ e ancora «*mallium cum azarino dema et aliis necessariis pro laborando*»¹¹⁰. Qui

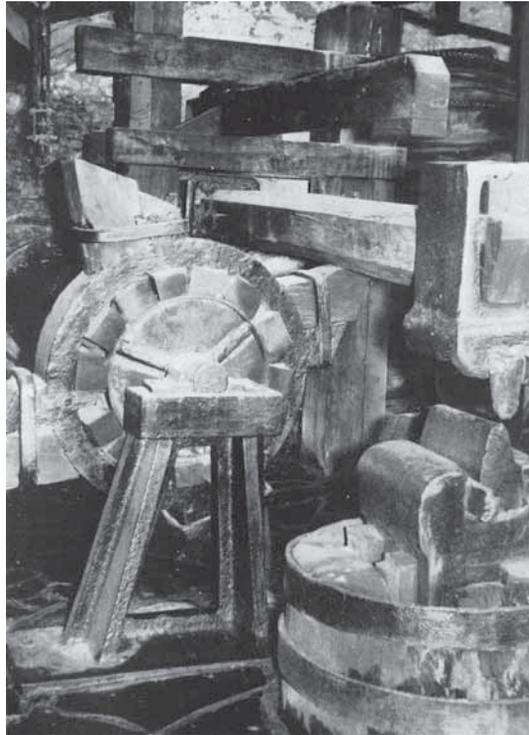
¹⁰⁷ Questa struttura è molto chiara anche nelle illustrazioni del trattato dell'Agricola (*De Re Metallica*), anche se non è mai rappresentato in maniera completa.

¹⁰⁸ Baraldi 1979, p. 119.

¹⁰⁹ Baraldi 1979, p. 122.

¹¹⁰ Ivi, p. 121.

identifichiamo con chiarezza tutta la struttura operativa del maglio; ove per “mallium” si intende la mazza battente metallica con il relativo manico e la “*dema*” è il grande parallelepipedo di pietra recante l’incudine. Essa è alloggiata nel terreno in corrispondenza della mazza battente. L’“*azzarino*” è una sorta di incudine che si incastra nella *dema* e talora per lavorazioni particolari o per logoramento viene sostituito. Con i «*munimentis pro laborando*» o «*aliis necessariis pro laborando*», l’estimatore intende probabilmente gli utensili in acciaio che si incastrano sull’estremità della mazza e talora anche sull’“*azzarino*” e servono per le singole lavorazioni tipiche della fucinatura, ovvero schiacciamento, taglio o punzonatura. La “*boga*”, ripetutamente citata nei documenti, è un pesante collare di ferro con due coni contrapposti che viene calzato sul manico del maglio e impegnato sui montanti in cuscinetti metallici (recentemente di bronzo) per servire da fulcro all’asta. Il passo «*rota mallii cum arbore...cum seitro*»¹¹¹ indica la ruota del maglio, con il relativo albero e la gronda che conduce l’acqua alle pale della ruota (“*seitro*”). Negli estimi del 1492 sono citati gli “*zochi*”¹¹², che sono i montanti in pietra o in legno che costituiscono l’incastellatura rigida del maglio. Rispetto al materiale impiegato il documento non è chiaro. Da questi estimi sembra potersi escludere la presenza di magli in batteria, quali risultano nei secoli successivi.



Il martinetto o maglio laterale di Bouillon (Nancy - Francia).

Un secondo documento di grande rilievo è quello relativo all’estimo notarile del 1624 relativo al grande complesso di fucina di Bon Port nel Giura francese¹¹³, ove si trovano due impianti di maglio. Il primo definito “*marteau hydraulique*”, e il secondo “*martinet*”. Apparentemente si tratta di due strutture materiali differenti dove il “*martinet*” è probabilmente un maglio all’italiana mentre il “*marteau*” è un maglio alla tedesca¹¹⁴. È anche possibile che gli impieghi fossero differenti. Ad esempio una macchina poteva essere impiegata in lavori di forgiatura e l’altra come pestatoio per la frantumazione della ghisa greggia destinata all’affinazione.

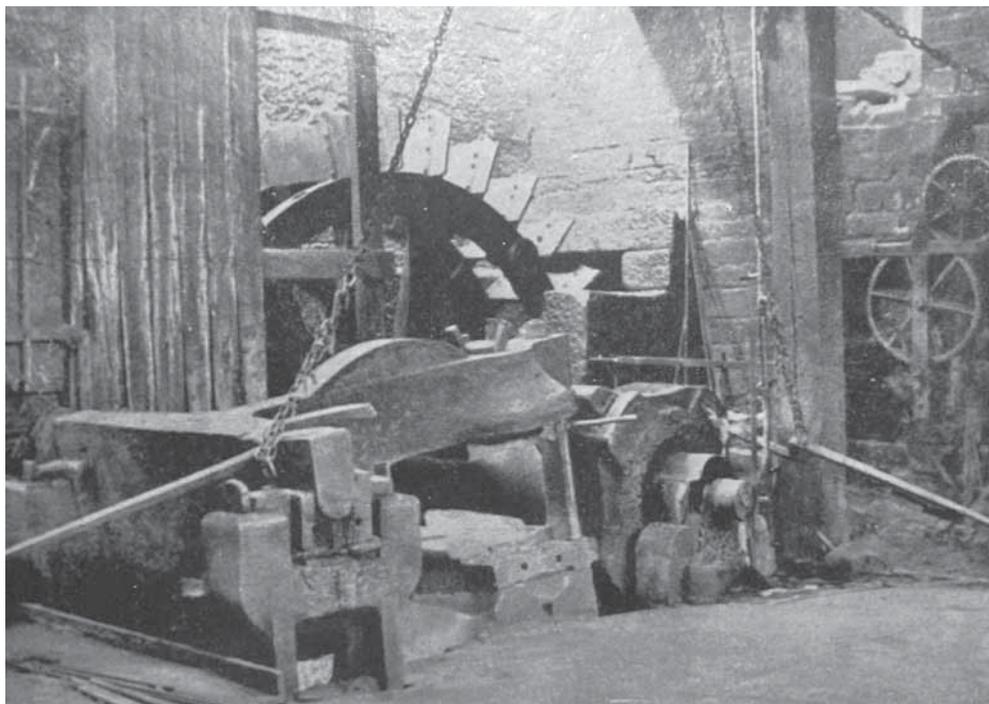
¹¹¹ Baraldi 1979, p. 124.

¹¹² Ivi, p. 125.

¹¹³ Pelet 1971, p. 40.

¹¹⁴ Ivi.

Dalle descrizioni è possibile riconoscere numerose parti strutturali. Nel “marteau” risulta «*le plantement bon et entier, au but des quattres colomnes; à chescune una frespe de fert*»¹¹⁵. Si tratta dei montanti realizzati in legno (quattro tronchi cerchiati in ferro) con le traverse lignee, che completano l’incastellatura. Nel “martinet”, il “plantement” risulta alloggiato su due “*plotz*”, forse montanti litici. Inoltre la descrizione registra «*le manche aveq son marteau*» (manico e mazza battente), ove il manico risulta cerchiato di ferro («*au manche deux frespe et una cheville de fert*»)¹¹⁶. Nel caso del “martinet”,



Il potente maglio frontale fotografato negli anni Cinquanta del Novecento in una forgia del Grand Est della Francia la cui struttura è simile a quella illustrata nei disegni di W. De Saint Ange. (Da Salin 1960).

si registra anche l’“*housse*”, collare in ferro recante i due supporti conici del fulcro (la boga dell’ambiente italiano). In entrambi i casi il manico reca «*la bascongne aveq une grande frespe qui tombe sur le ressort*»¹¹⁷. Si tratta del meccanismo che ad ogni sollevamento della mazza fornisce il contraccolpo agendo da molla di contrasto. Questo consta di una parte a forma di robusto cerchio in acciaio (“grande frespe”), montata sul manico (“bascongne”) che ad ogni colpo viene scagliata sulla molla di ferro crudo (“*ressort de fert crud*»), che nel caso del “martinet” è alloggiata opportunamente su un grande supporto litico.

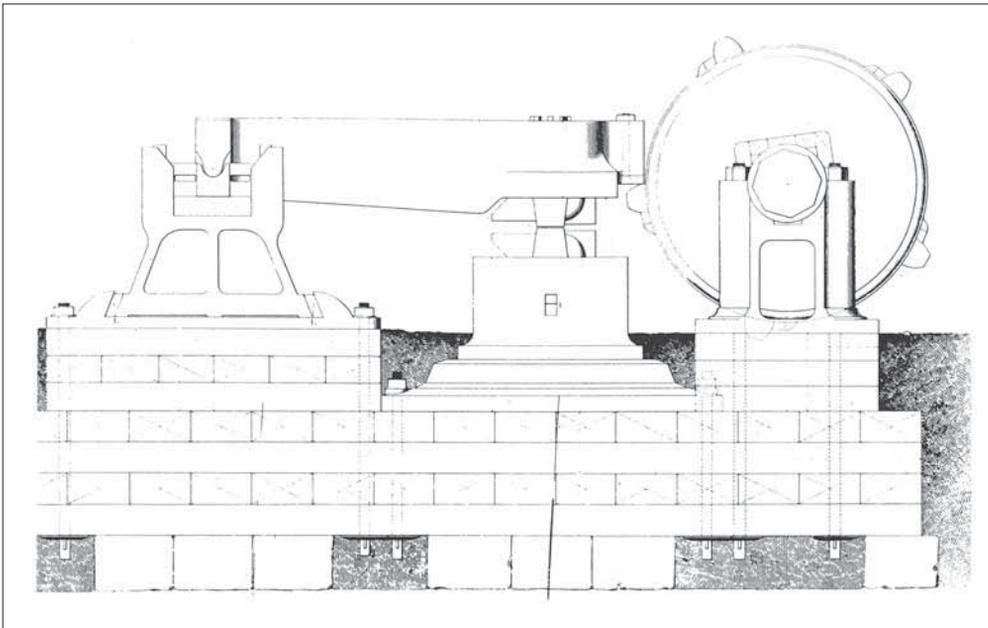
Sistemato nel terreno di fronte alla mazza battente si trova «*le trou ou est l’enclume de fert crud*», cioè il cavo nel grande parallelepipedo di pietra sul quale viene alloggiata

¹¹⁵ Pelet 1971, p. 52.

¹¹⁶ Ivi.

¹¹⁷ Ivi, p. 40.

l'incudine (la "dema" e l'"azarino" italiani)¹¹⁸. Entrambe le descrizioni citano la ruota motrice¹¹⁹, con l'albero, le colonne lignee di ancoraggio e i cerchi in ferro, «*la roue qui fait aller le marteau avec son arbre en bon estat, avec ses deux torrillon et six frespe pour tenir les dits torrillon*»¹²⁰. La ruota è definita a "olevest"¹²¹, cioè a palette. L'impianto è completato da «*les arches en bon estat*» identificabili come le balconate di sostegno del canale di adduzione e «*deux cenebre de fert battu*»¹²², le paratoie con le quali si parzializza l'acqua che giunge alle ruote.



Maglio ad azionamento frontale dai rilievi contenuti nel trattato *Métallurgie Pratique du Fer* di Walter De Saint Ange pubblicato nel 1835.

Tra le illustrazioni rinascimentali del maglio vanno ricordati gli schizzi di Leonardo e in particolare lo schema funzionale di un maglio terminale contenuto nel codice atlantico¹²³ (v. p. 195), uno schizzo di Filarete, i già citati disegni di Olaus Magnus¹²⁴, e quelli decisamente più dettagliati, anche se incompleti, dell'Agricola¹²⁵.

Relativamente ai magli moderni, si ritiene che l'opera del De Saint Ange¹²⁶ rappresenti, ancora una volta, il trattato più completo disponibile in questo campo, si rimanda pertanto a tale opera, non ritenendo indispensabile, in questa sede, di riportare le lunghe e circostanziate descrizioni, avendo già riprodotto alcune tra le illustrazioni

¹¹⁸ Pelet 1971.

¹¹⁹ Del tipo per di sopra.

¹²⁰ Pelet 1971, p. 54.

¹²¹ Del tipo per di sopra.

¹²² Pelet 1971, p. 52.

¹²³ Portoghesi 1981, p. 119.

¹²⁴ Tylecote 1985, p. 171.

¹²⁵ Agricola 1563, p. 365.

¹²⁶ De Saint Ange 1835, p. 26.

più significative. Su questo tema si dispone anche di una notevole documentazione derivante dai rilievi dei già citati censimenti napoleonici¹²⁷ e delle numerosissime evidenze archeologiche ed etnologiche disponibili nei differenti contesti storici del continente europeo¹²⁸. Tra tutti i documenti materiali disponibili spiccano le testimonianze archeologiche degli impianti, i quali - ancorché spogliati delle parti lignee e metalliche - conservano i possenti montanti lapidei con gl'incavi degli alloggiamenti delle traverse, unitamente ai numerosi basamenti, tra i quali i supporti dell'albero motore con le rela-



Resti della batteria di due magli a testa d'asino del tipo terminale nella ferriera di Ceresole Reale (Piemonte), il cui impianto è citato in un consegnamento del 1568: "...in finibus Cerixolarum... in la Fray... sive ad martinetum".

tive sedi dei cuscinetti. Gli ambienti naturali dei torrenti di montagna contengono molte testimonianze degli impianti di maglio a testa d'asino, ove talora sono riconoscibili anche i canali di adduzione e i resti degli edifici.

10.3.4. Le berte

Tra il secolo XIX e la prima metà del successivo in molte forge si diffonde un tipo di maglio a caduta libera denominato "berta" che consente la fucinatura con poche percussioni di un particolare sagomato entro uno stampo. Questo tipo di macchina trova notevole diffusione con la crescita della produzione industriale. Il sistema consiste in un'incastellatura rigida disposta a reggere una coppia di guide verticali tra le quali scorre una mazza battente, sollevata dall'avvolgimento su una puleggia, azionata da una ruota idraulica, della grande cinghia in cuoio di cammello a cui è vincolata, grazie a un

¹²⁷ Documentazione di questo tipo è diffusissima in tutti gli Archivi di Stato, periodo: Dominio Napoleonico.

¹²⁸ Gli inventari dei Beni Culturali in questo campo sono sempre più numerosi ed evidenziano una grande diffusione delle evidenze archeologiche.

meccanismo a frizione. La percussione avviene su un basamento metallico alloggiato sul terreno con funzione di incudine sul quale ricade la mazza. La macchina consente il montaggio di stampi sagomati a doppia valva che possono modellare plasticamente un particolare mediante percussione della mazza battente lasciata cadere per gravità dall'alto della struttura, dove viene condotto il pesante percussore trascinato dalla cinghia pressata da due pulegge.



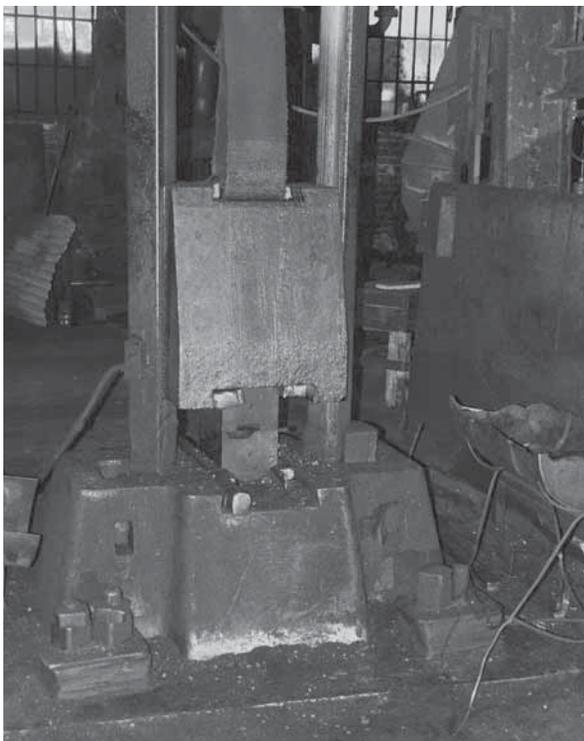
Il maestro Domenico Comensoli di Bienno (Brescia) mentre forgia un badile al maglio terminale sagomandola con una serie di colpi sapientemente localizzati.

(A lato) Dettaglio delle fasi di forgiatura del badile.

Analisi dei documenti

L'azione di forgiatura avviene grazie alla sagoma degli stampi, costruiti in solido acciaio cementato e temprato. L'abilità dell'operaio addetto alla lavorazione consiste nel posizionamento del massello riscaldato al calore bianco (circa 1250°C) sulla valva di base fissata all'incudine facendo uso di tenaglie, mentre un aiutante immette un distaccante, normalmente costituito da piccole porzioni di olio esausto o segnature fine. Questi materiali a contatto con il massello incandescente s'incendiano e il gas prodotto dalla combustione impedisce al particolare forgiato di aderire allo stampo. Per queste lavorazioni è richiesto un grande coordinamento nei movimenti al fine di posizionare il massello riscaldato correttamente all'atto della percussione.

10. La fucina di trasformazione



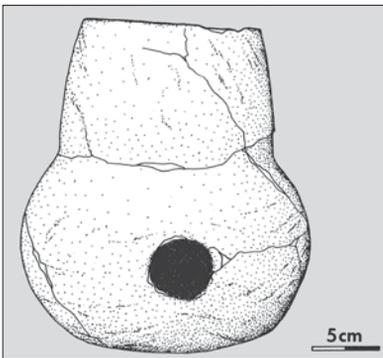
(A lato) Veduta generale di una berta e particolare dell'incudine con il basamento parzialmente entro terra. Al di sopra vi è la mazza battente in stato di riposo ove è visibile l'aggancio con la pesante cinghia di cuoio.

(Sopra) Lavoro di approntamento degli stampi su mazza battente e incudine e lavoro di fucinatura di un particolare nel momento della percussione.

(Fotografie scattate nella fucina Giovannini di Corio (Torino).

10.4 La struttura materiale del mantice

L'origine del mantice si perde nella preistoria e accompagna l'intera evoluzione della tecnologia metallurgica. Le testimonianze materiali più antiche riportano a semplici pelli di animali opportunamente sistemate in modo che per pressione esercitata manualmente possano offrire un getto d'aria sufficientemente potente. Altre forme di mantici note sin dalla tarda Preistoria sono quelli a membrana su camere in terra cotta del tutto simili a quelli ancora in uso presso le popolazioni africane all'inizio del XX secolo.



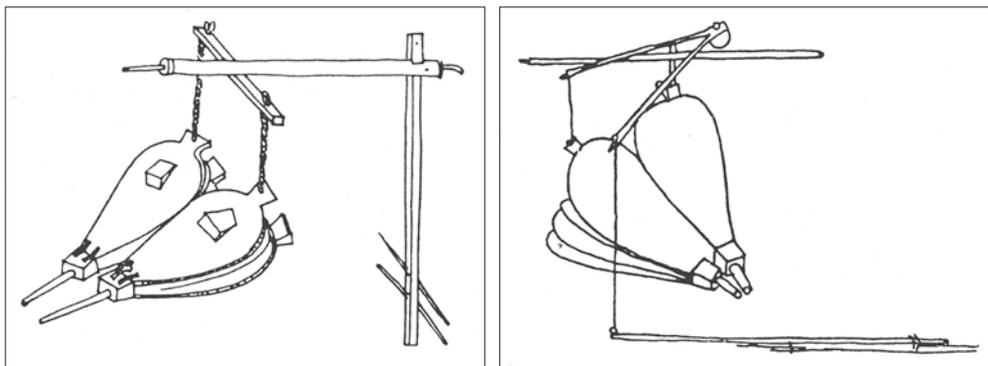
(Sopra) Il mantice di una Piccola fucina sei-settecentesca di un villaggio alpino (Alpi occidentali a Buttifinera - Pont Canavese - Torino). Si tratta di un sistema a doppio palmento non dissimile dalle analoghe strutture medievali, così come sono documentate nei testi classici di Agricola e Biringuccio.

(A lato) Piccola camera di compressione in terracotta di un mantice a membrana di età romana dal Galles.

La ricerca di una maggiore potenza e regolarità nel getto d'aria prodotto è ampiamente documentato nel lavoro dei tecnici medievali. Come nel caso di numerose altre macchine, proprio in questo periodo, compaiono i primi disegni relativi a impianti meccanizzati (cfr § 10.2.1, p. 196). Quanto poi ai dettagli della struttura materiale, i primi elementi sono ascrivibili al XV secolo, ad opera degli ingegneri italiani.

Il mantice meccanizzato medievale è applicato ai forni a manica o ai bassi fuochi e più raramente alle forge che solitamente funzionano con mantici azionati a mano.

Questa macchina, strutturalmente piuttosto complessa, deve rispondere al requisito fondamentale di fornire un getto d'aria il più possibile continuo, al fine di garantire una marcia regolare al processo metallurgico. Data la complessità costruttiva molto spesso il suo valore supera quello del piano di forgia che alimenta e talora anche dello stesso forno, soprattutto se si tratta di un basso fuoco a catasta, poiché impiega materiali di un certo pregio. Inoltre richiede manutenzioni frequenti per via dei numerosi meccanismi soggetti a usura. La sua struttura fondamentale deriva dalla corrispondente macchina



(A sinistra) Disegno del Ghiberti di una coppia di mantici ad azionamento manuale in alternanza.
(A destra) Disegno di Leonardo da Vinci di un sistema analogo.

manuale che in origine era rappresentata da una semplice pelle di animale cucita, compressa manualmente e dotata di una valvola a contrasto. Più tardi il sistema è evoluto in una struttura maggiormente articolata, costituita da due palmenti connessi da una chiusura in cuoio.

Con l'evoluzione dei sistemi metallurgici il mantice ha migliorato le prestazioni raggiungendo strutture articolate e dimensioni consistenti, ancora basate sul principio di due palmenti di legno fulcrati a un'estremità che oscillano comprimendo l'aria trattenuta dai rivestimenti stagni di cuoio, muniti di valvola a contrasto, con i quali si può porre in movimento un notevole volume di aria. Al fine di garantire un getto con buona continuità, gli impianti meccanizzati prevedono una coppia di mantici affiancati, azionati alternativamente da un semplice sistema a bilanciere.

Vincolando a uno dei due palmenti di ognuno dei mantici a un'asta solidale con un bilanciere, a cui sono collegate le estremità libere, è possibile comprimere la camera di un mantice quando quella dell'altro si dilata e viceversa. Nel caso di macchine ben equilibrate è possibile ottenere un getto d'aria pressoché continuo con un solo mantice a tre palmenti dove i laterali sono fissi e viene azionato quello centrale, o viceversa.

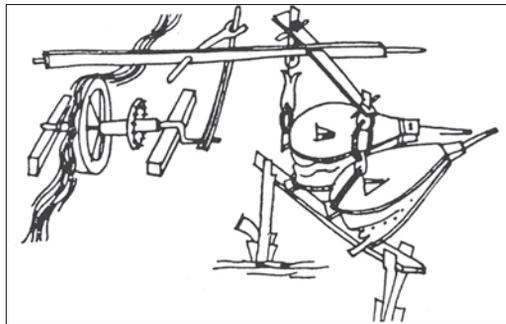
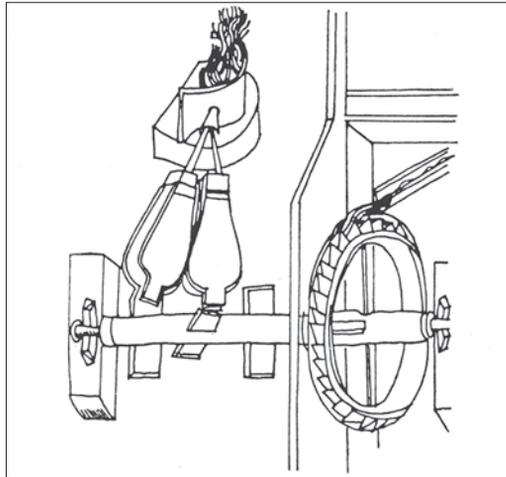
10.4.1 La batteria a camme

La struttura materiale del mantice a camme è la più semplice e forse anche la più antica. Consiste in una coppia di elementi soffianti i cui palmenti superiori sono fissati a un'incastellatura lignea, mentre quelli inferiori, sono lasciati liberi di aprirsi per gravità

e eseguendo l'aspirazione. L'alloggiamento in posizione opportuna dell'albero motore consente alle camme montate su di esso di eseguire la compressione per schiacciamento verso l'alto del palmento libero una volta ogni giro o mezzo giro. La disposizione delle camme sull'albero attua la compressione alternativamente affinché quando uno esegue l'ispirazione, l'altro è in compressione e viceversa, ottenendo un getto continuo.

10.4.2 La batteria azionata dal sistema biella - manovella

Il sistema biella - manovella azionante la coppia di mantici, come in tutti gli altri casi è mosso da una ruota idraulica e la biella viene collegata da un lato alla robusta manovella metallica che funziona da eccentrico. Questa è calettata in asse sull'albero motore mediante contrasti metallici che la rendono solidale con questo e in grado di sostenere gli sforzi torcenti. L'altra estremità è connessa al bilanciante oscillante che comanda direttamente i mantici. Ad ogni giro dell'albero si svolge un ciclo completo di aspirazione - compressione per ognuno dei due mantici, perché il bilanciante fornisce un movimento alternativo che, grazie a un semplice snodo, viene trasferito al bilanciante, il quale oscillando aziona alternativamente i palmenti. Un meccanismo del tipo "biella - manovella" è solitamente impiegato anche nei mantici verticali a tre palmenti, dove in luogo di un bilanciante la biella agisce su un'asta che oscilla verticalmente ponendo in movimento i palmenti.



(Sopra) Disegno del Taccola di un impianto di mantici a batteria con azionamento idraulico azionati in alternanza dal cinematismo a camme.

(Sotto) Disegno del Neroni di un impianto analogo con il l'azionamento basato sul meccanismo biella-manovella.

Analisi dei documenti

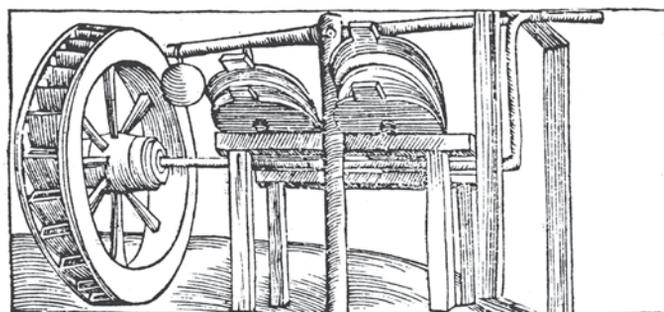
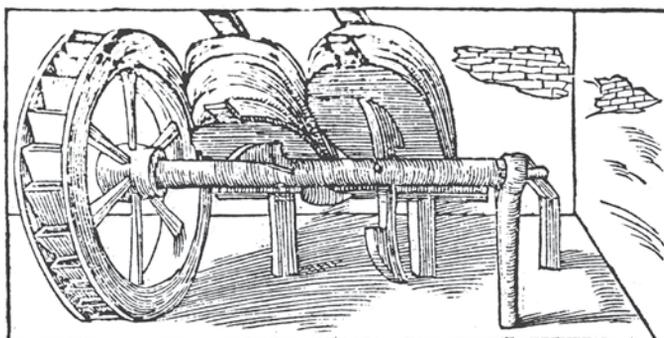
I reperti archeologici riferibili a questo particolare tipo di macchina sono particolarmente scarsi. L'unico elemento di rilievo da segnalare è la camera fittile di un mantice di attribuzione romana proveniente dal Galles (Gran Bretagna)¹²⁹, oltre al documento analogo in concotto, rinvenuto nella ferriera di Scarmagno (Piemonte)¹³⁰. Altre testimonianze afferiscono agli ultimi secoli.

Il primo disegno particolareggiato di un impianto di mantici mosso dall'energia

¹²⁹ Cleere, Crosley 1985, p. 187.

¹³⁰ Cima 2019, p. 189.

idraulica è attribuibile all'ingegnere senese Mariano Jacopo detto Taccola morto prima del 1458. Esso mostra una coppia di mantici azionati alternativamente da un sistema idraulico costituito da una ruota del tipo "per di sopra", con un albero motore supportato alle estremità da perni metallici e munito di camme in grado di comprimere alternativamente ognuno dei due palmenti liberi. Un secondo impianto è descritto a breve distanza di tempo da Bartolomeo Neroni detto il Ricco. Questi mostra un impianto basato su un sistema biella-manovella azionante la coppia asta-bilanciere in grado di muovere al-



Disegni di batterie di mantici meccanizzati da *De la Pyrotechnia* di Vannoccio Biringuccio (1540). Sopra il sistema a camme e sotto quello con l'azionamento biella-manovella.

ternativamente i due mantici¹³¹. Le due strutture appaiono entrambe funzionali e ottimizzate sul piano tecnico già nel XV secolo e di conseguenza si può ritenere che fossero piuttosto diffuse.

Quasi un secolo più tardi Biringuccio¹³² mostra ben otto disegni di mantici, tra cui se ne contano tre meccanizzati. Se si escludono lievi differenze inessenziali dal punto di vista funzionale, è possibile ritrovare, sia il sistema di azionamento a camme del Taccola, sia quello mediante biella-manovella del Neroni. Lo stesso autore descrive in ma-

niera circostanziata entrambi gli impianti, fornendo tutti i dettagli costruttivi. Una coppia di mantici azionati da un albero a camme è illustrata anche nel Graduel di Saint Dié datato all'intervallo 1505 - 1515 (v. p. 193).

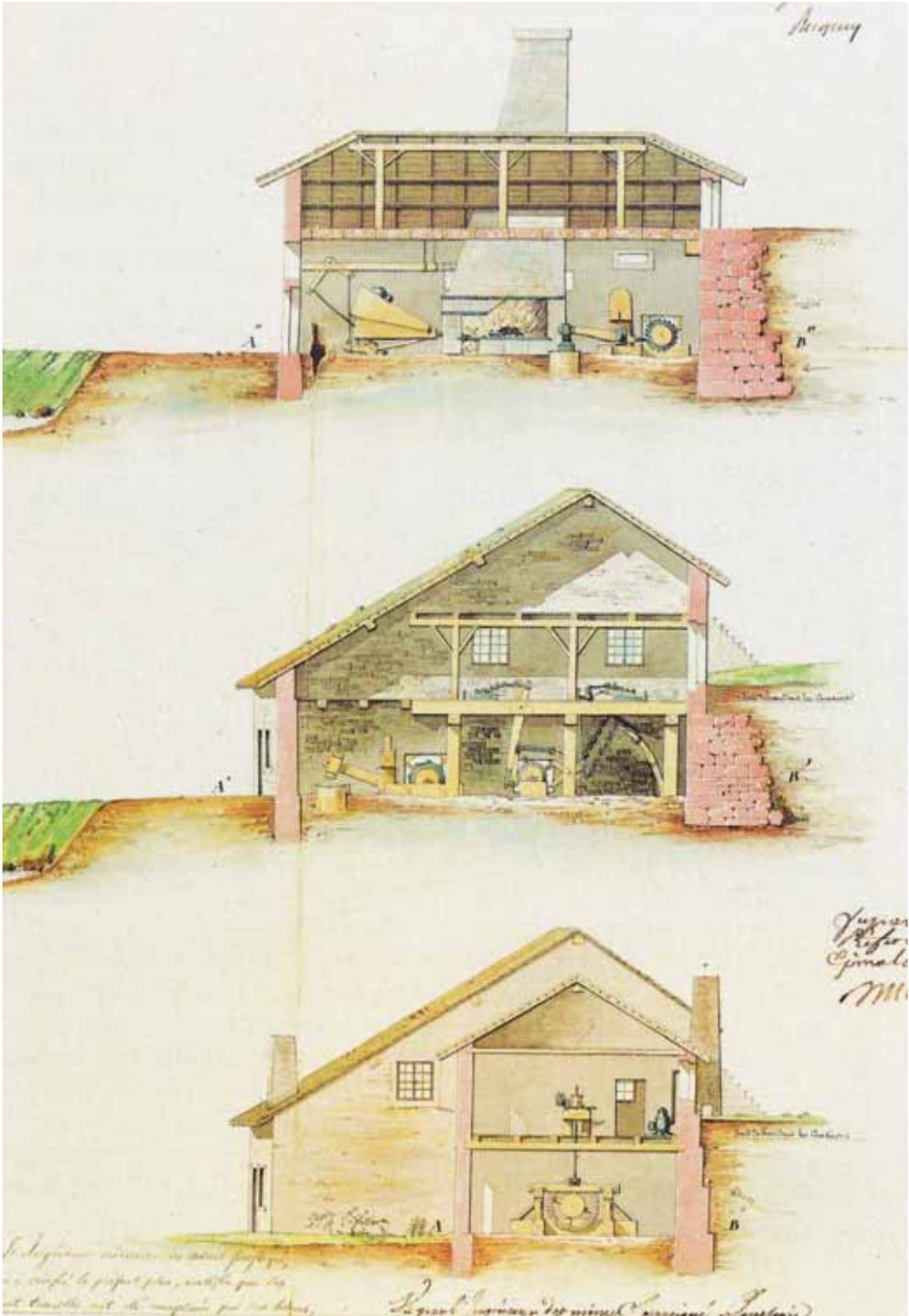
Ampio spazio alla descrizione dei mantici lo dedica Giorgio Agricola senza peraltro proporre novità di rilievo¹³³. Un disegno di mantice verticale, con buona fedeltà alle problematiche tecniche e alla funzionalità è contenuto nel Taccuino di Francesco di Giorgio Martini e una suggestiva descrizione accompagnata da un disegno del 1460 è attribuibile al Filarete relativamente all'impianto di Ferriere in Val di Nure nell'Appennino tosco-emiliano in provincia di Piacenza¹³⁴. Un altro buon disegno di un complesso

¹³¹ Gille 1972, p. 104.

¹³² Biringuccio 1540, p. 109.

¹³³ Agricola 1563, p. 320.

¹³⁴ Baraldi, Calegari 1991, p. 135.



Fabbrica di filo di ferro forgiato e trafilato in un rilievo ad acquerello del 1819 a Bellefontaine Le-Blanc-Murget (Vosgi - Francia). Le tre viste riguardano: (in alto) il fuoco di forgia con il maglio dove il ferro viene "tirato" in barre; (al centro) la prima trafiliera a tenaglia; (in basso) la trafiliera "fine" a bobina.

sistema di mantici è offerto da Agostino Ramelli ne “Le diverse et artificiose macchine” del 1588 (v. p. 197).

Oltre ai diffusissimi mantici a soffietto riscontrabili in numerosi contesti vanno considerati i mantici a cassette che entrano in uso sporadicamente nel XVI secolo per trovare una più larga diffusione nel secolo successivo.



Tromba idroeolica raffigurata nel manuale di Marco Antonio Della Fratta Montalbano “Pratica Medievale” del 1678, dove si vede la struttura di questa macchina che entra nei sistemi metallurgici nel corso del XVII secolo. Il sistema non prevede cinematismi ma unicamente una caduta d’acqua in un tubo verticale che finisce in una botte rovesciata dove il getto d’acqua con aria richiamata dalla depressione prodotta nella caduta s’infrange.

in una botte parzialmente immersa in un bacino appositamente creato nella roggia di scarico. Questa è dotata di un’apertura piuttosto ampia collocata a discreta profondità sotto il pelo libero dell’acqua. Nella parte alta della botte è collocato un tubo “portavento”¹³⁵ che raccoglie l’aria compressa dalla colonna d’acqua e la conduce al forno o alla forgia. Il principio di funzionamento è semplice e consiste nell’estrarre dalla co-

¹³⁵ Così nella descrizione del Della Fratta, redatta con precise indicazioni costruttive corredata da un disegno dettagliato con le diverse strutture di questo sistema, per la prima volta riprese in un trattato.

10.5 La tromba idroeolica

Questo singolare meccanismo, a partire dalla fine del XVII secolo, soppianta progressivamente i mantici, divenendo la principale macchina soffiante sia nel contesto della fucina sia in quello della ferriera e talora del più complesso sistema dell’altoforno. L’affermazione della nuova macchina è piuttosto lenta. Ancora negli anni 1770 e addirittura nei primi decenni del XIX secolo si registrano moderni impianti di altoforno ventilati mediante batterie di mantici, come dimostrano numerosi esempi, come nel caso dell’impianto di Montbard presso Nancy.

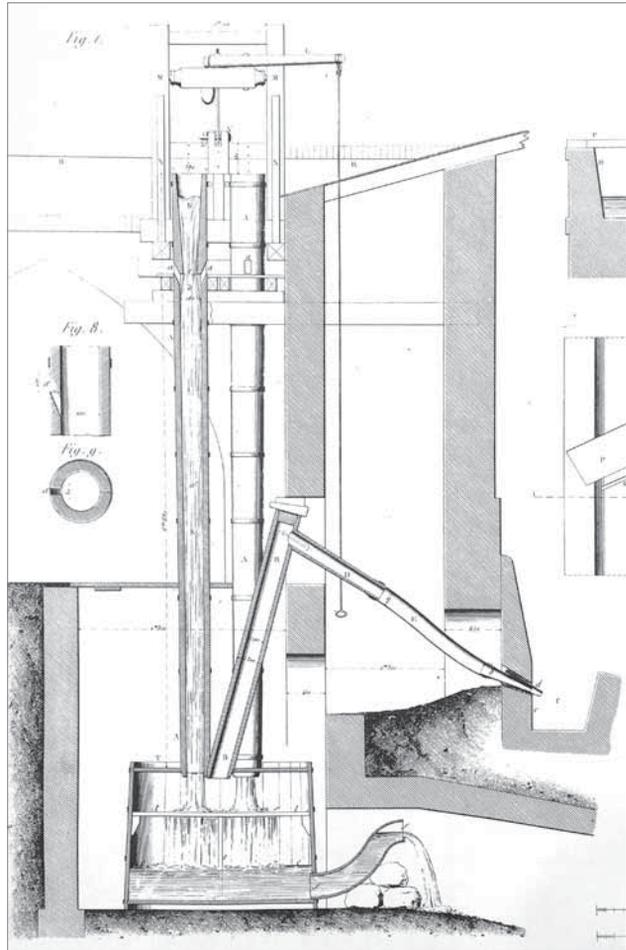
Strutturalmente il sistema si compone di un tubo posto verticalmente (tromba), alimentato dall’alto da un canale di gronda, che conduce l’acqua a cadere violentemente su di un supporto rigido contenuto

lonna d'acqua l'aria trascinata nella caduta raccogliendola nella parte alta della botte immersa e convogliandola alla base del fuoco. Il trascinamento di significativi volumi d'aria nella caduta è garantito da una serie di fori inclinati presenti nella parte alta della tromba.

Nel corso del Settecento queste macchine subiscono modificazioni che portano a varianti locali meglio confacenti alle esigenze produttive dei singoli distretti. Nell'area basca e in quella corsa, ad esempio, si riscontrano trombe quadrate connesse mediante tavole ben sigillate, talora agenti in coppia, mentre nel resto dell'Europa permangono prevalentemente le strutture a sezione circolare.

Analisi dei documenti

Sembra che possano interpretarsi come trombe idroeoliche alcuni elementi mostrati nel Codice Atlantico di Leonardo dei primi due decenni del XVI secolo¹³⁶, anche se nessuna traccia del loro impiego emerge prima della seconda metà del XVII secolo, sia dalle fonti archeologiche, sia da quelle storiche. La prima trattazione tecnica completa di questa macchina è fornita da Della Fratta¹³⁷. Egli suggerisce di costruire «...una botte a modo di tinazzo che abbia l'uno e l'altro fondo» e in questa praticare un foro in basso «dove si deve fare una cassetta quadrata...», che ha il compito di mantenere il pelo libero dell'acqua sopra l'orifizio. Fermato bene in terra il "tinazzo", si fa la tromba con un lungo legno «senza groppi ... segandolo per lo mezzo ... Segato che sarà si deve incavare con la zappetta rotonda ... (e) ... con un ferro rovente lisciando quanto si può questa incavatura ... Per maggior bellezza, e per maggior comodo, e leggerezza, si riduce anco per di fuori detta tromba rotonda, eccetto che nella



La tromba idroeolica a doppia caduta descritta e illustrata dal Walter De Saint Ange.

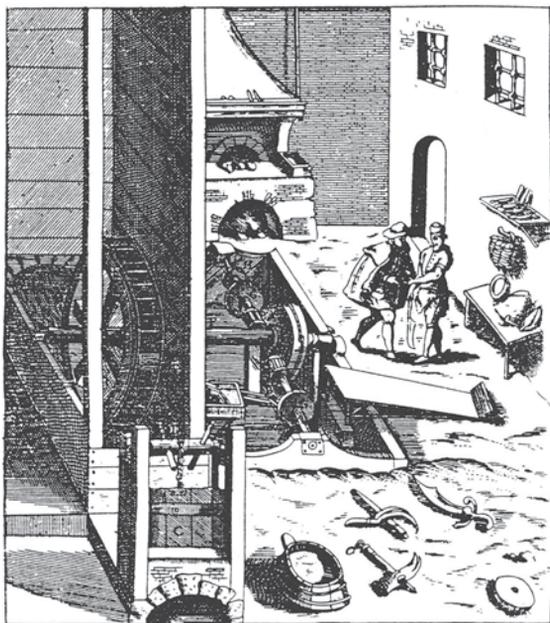
«tinazzo», si fa la tromba con un lungo legno «senza groppi ... segandolo per lo mezzo ... Segato che sarà si deve incavare con la zappetta rotonda ... (e) ... con un ferro rovente lisciando quanto si può questa incavatura ... Per maggior bellezza, e per maggior comodo, e leggerezza, si riduce anco per di fuori detta tromba rotonda, eccetto che nella

¹³⁶ Tylecote 1987, p. 345.

¹³⁷ Della Fratta Montalbano 1678, p. 79.

testa, la quale si lascia quadra... Fatte queste diligenze, si commette l'una e l'altra parte insieme, ponendo sopra ambedue le sponde dello sterco di pecora ... e s'inchiodano insieme in modo che non sfiatino ...».

La tromba, dopo essere stata forata nella testa affinché possa risucchiare aria dall'atmosfera, viene montata in modo da condurre l'acqua all'interno del "tinazzo" dove si pone una lastra litica sulla quale deve infrangersi. L'autore raccomanda anche di fare un'apertura sulla parte alta del tinazzo nella quale si colloca il "portavento", precisando



Mola ad azionamento idraulico dal "Nuovo Teatro di Macchine et Edifici" di Vittorio Zonca del 1607.

«ch'è un legno naturalmente un poco torto in modo che faccia quasi un semicircolo. Questo si sega in mezzo e poi si cava...». In sostanza si tratta di un tubo. Per migliorare la qualità dell'aria immessa nel forno o nel focolare l'autore propone di interporre nel portavento una piccola botte con lo scopo di creare una camera di decompressione al fine di far condensare parte del vapore d'acqua, raccolto con l'aria nel tinazzo¹³⁸. Di rilievo il fatto che nella ferriera dei marchesi d'Invrea a Ponte d'Invrea (Genova), nell'estimo del 1621 risulta già un impianto di tromba idroeolica mentre l'estimo di Bon Port¹³⁹ del 1623 registra ancora l'alimentazione dei fuochi mediante i mantici ad azionamento

idraulico (*«la roue qui facit aller le soufflet»*).

10.6 La mola

Un impianto meccanizzato, talora presente nelle fucine medievali, riguarda le mole. Una macchina di questo tipo, peraltro manuale, è segnalato a Beauvais nel 1195¹⁴⁰ e il Salterio di Utrecht (IX sec.) riporta l'immagine di una mola a manovella per affilare le lame di spada. Da questa struttura materiale è quasi certamente derivata la macchina più moderna che alla fine del Medioevo è presente in molte fucine con il relativo azionamento idraulico. La mola azionata da una ruota ad acqua è la macchina più semplice tra quelle impiegate nella fucina medievale e moderna¹⁴¹, ma al contempo è essenziale

¹³⁸ Della Fratta Montalbano 1678, p. 83.

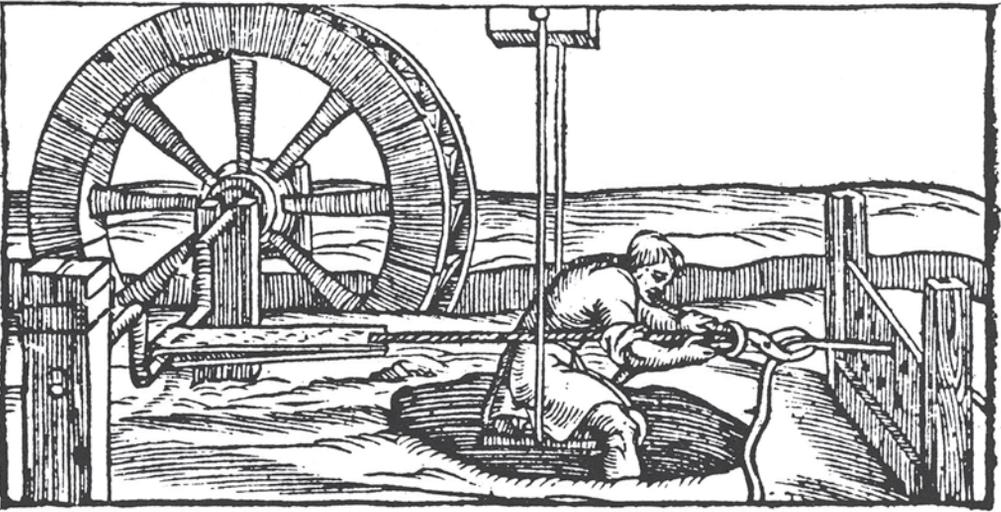
¹³⁹ Pelet 1971, p. 40.

¹⁴⁰ Gille 1970, p. 150.

¹⁴¹ Salin 1957, p. 64.

nella produzione di strumenti e armi da taglio. Essa deriva direttamente dalla mola manuale e consiste in un cilindro di pietra abrasiva montato sull'albero motore in legno ben bilanciato. Sullo stesso è montata la ruota e il sistema è sostenuto da due perni d'acciaio inseriti solidalmente in asse alle estremità e alloggiati su supporti metallici (spesso di bronzo) ben fissati su due pesanti basamenti litici.

La lavorazione di molatura e affilatura avviene per pressione diretta manuale del manufatto sul cilindro abrasivo in rotazione. Gli impianti più recenti, oltre a comprende-



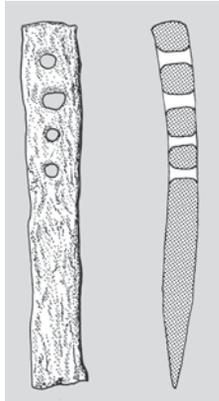
(Sopra) Trafila meccanizzata per la produzione del filo di ferro da De La Pirotechnia di Biringuccio (1540).

(A lato) Utensile per la trafilatura manuale dallo Jutland (Danimarca).

re l'azionamento idraulico, talora prevedono anche una coppia di ingranaggi paralleli o un sistema a pulegge al fine di aumentare la velocità dell'utensile¹⁴².

Analisi dei documenti

I documenti storici relativi alle mole idrauliche sono piuttosto numerosi e rimandano ai primi impianti idraulici impiegati nelle fucine (v. § 10.2.1). Oltre al disegno del Salterio di Utrecht, la prima notizia è riferibile al Beauvais ed è del 1195¹⁴³; altre successive sono ascrivibili al Giura Vodese e al Delfinato¹⁴⁴. Le fonti riguardano unicamente la testimonianza dell'impianto e non chiariscono le caratteristiche strutturali della macchina. La più antica immagine nota di una mola manuale è quella citata, contenuta nel Salterio di Utrecht, che mostra la molatura di una spada a opera di un tecnico coadiuvato da un aiutante¹⁴⁵ impegnato



¹⁴² Pelet 1978, p. 44.

¹⁴³ Ivi, p. 53.

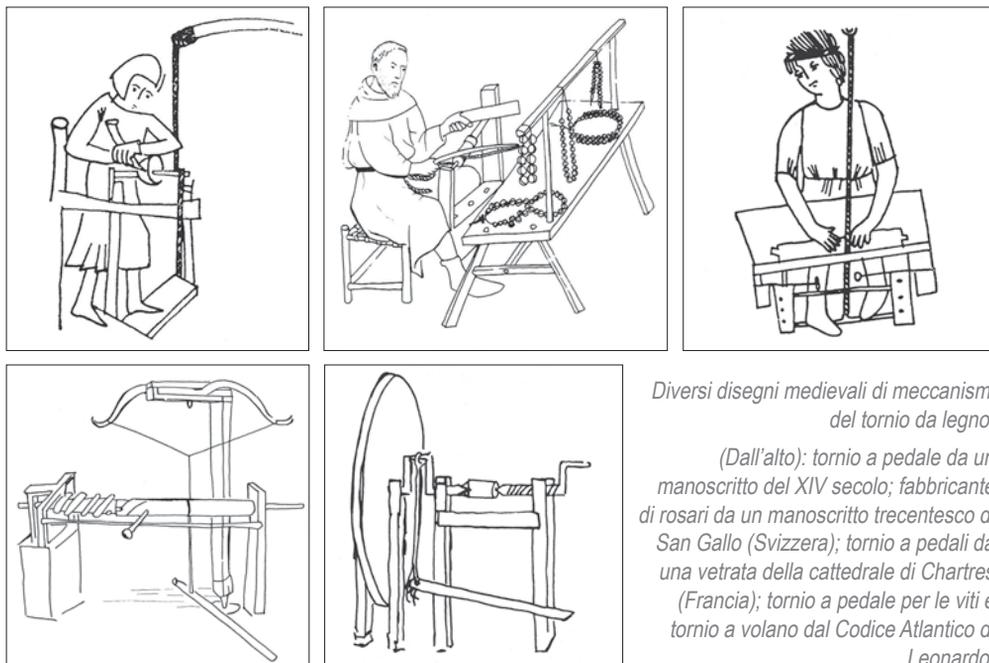
¹⁴⁴ Ivi, p. 54.

¹⁴⁵ Salin 1957, p. 64.

nell'azionamento del meccanismo mediante una manovella (v. p. 194).

Un'illustrazione più recente di una mola è contenuta nella cronaca di Tschachtlan del 1470, ove è mostrata una macchina lambita dalla corrente d'acqua che la pone in movimento e bagna l'utensile favorendone l'azione abrasiva¹⁴⁶.

Impianti moderni, sia ad asse semplice, sia a moltiplicatore del moto, sono numerosi nelle fucine di tutta Europa.



Diversi disegni medievali di meccanismi del tornio da legno.

(Dall'alto): tornio a pedale da un manoscritto del XIV secolo; fabbricante di rosari da un manoscritto trecentesco di San Gallo (Svizzera); tornio a pedali da una vetrata della cattedrale di Chartres (Francia); tornio a pedale per le viti e tornio a volano dal Codice Atlantico di Leonardo.

10.7 La Trafileria

La produzione di fili di vari metalli, ma particolarmente di ferro è un'attività molto antica, che l'uomo realizza, mediante trafilatura sfruttando la duttilità del metallo, fortemente aumentata con il riscaldamento. In pratica l'operazione consiste nella produzione di verghe sbozzate manualmente o al maglio che, mediante trazione, vengono successivamente riscaldate e costrette a passare attraverso un foro calibrato tronco-conico, praticato in una piastra di acciaio temprato.

L'operazione può avvenire manualmente, mediante l'uso di un argano o di un vericello, con il quale rendere più efficace la trazione, oppure, a partire dall'impiego sistematico della ruota idraulica, mediante un apposito sistema meccanico a bilanciere che consente trazioni con forze decisamente importanti, indotte dalla notevole potenza espressa dalla ruota motrice ad andamento pulsante e di conseguenza con notevole efficacia produttiva.

¹⁴⁶ Pelet 1978, p. 32.

Analisi dei documenti

Il testo più antico che tratta estesamente della trafilatura è il *De la Pirotechnia*¹⁴⁷. Qui sono descritte con buona precisione diverse maniere di trafilare i metalli manualmente, utilizzando manovelle di diverse dimensioni a seconda del diametro del filo da produrre. Questi sistemi derivano dalla lavorazione dell'oro, essendo tra tutti i metalli il più duttile. Il Biringuccio osserva che parimenti si può trafilare il ferro, ma occorre che sia «*molto digrossato et bene ricotto*»¹⁴⁸.



(A sinistra) resti di un macchinario per trasmissione del movimento nella ferriera di Saint Barthelemy (Aosta).

(A destra) Tornio per la pietra ollare azionato da una ruota idraulica prelevato in un atelier antico e rimontato nel museo di Chiesa di Valmalenco (Sondrio). La struttura è simile alle macchine medievali.

Un utensile da trafilatura proviene dallo Jutland (Danimarca) e un secondo era contenuto nella cassetta vichinga rinvenuta a Mastermyr in Svezia. Questi strumenti rappresentano le poche evidenze materiali note di una trafilatura manuale¹⁴⁹, costituita da una piastra di acciaio sulla quale sono praticati fori calibrati con diametri differenti. Un'estremità leggermente acuminata della piastra lascia presumere l'infissione dell'utensile in un pesante ceppo.

La trafilatura può essere meccanizzata con un sistema biella-manovella azionato da ruota idraulica. In questo caso un operaio, seduto su una sorta di altalena ha il compito di lasciare e riprendere il filo ad ogni giro della ruota, come mostra la tavola del *De la Pirotechnia*. Sistemi più moderni risultano in uso nel XVIII secolo e prevedono macchine con bobina di trazione, ancora azionata mediante un motore idraulico che trasmette il moto ai meccanismi del sistema traente, con la facilità di arresto del movimento da parte dell'operaio addetto al fine di evitare lo strappo del filo nel caso di irregolarità fuori misura dell'asta grezza dalla quale si ottiene la trafilatura.

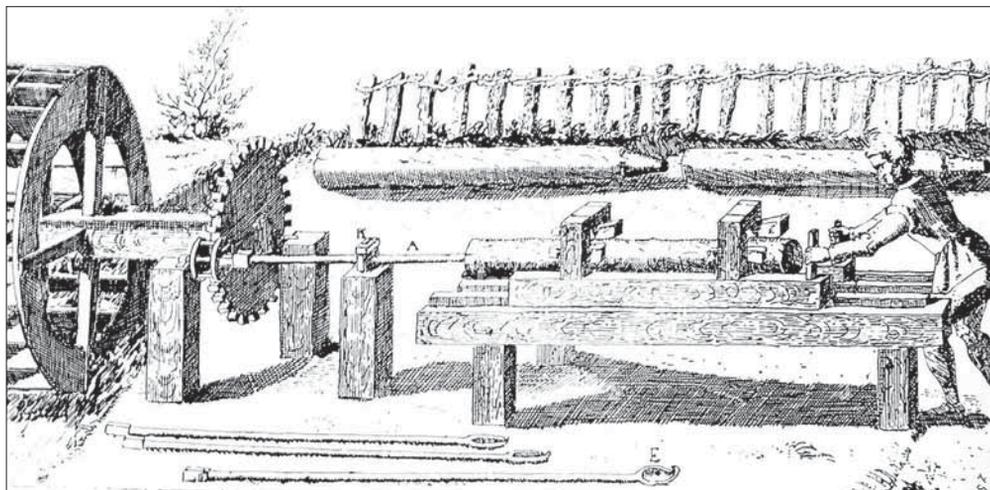
¹⁴⁷ Biringuccio 1540, p. 140r.

¹⁴⁸ Ivi.

¹⁴⁹ Tylecote 1987, p. 270.

10.8 Il tornio

Questa è una macchina che affonda le radici nella Protostoria e negli allestimenti produttivi la sua antichità è paragonabile a quella del mulino. Sono noti congegni, azionati manualmente o a pedale, con i quali sono stati modellati i vari oggetti in materiali anche molto diversi¹⁵⁰. Da questa semplice macchina è derivato il tornio della pietra ollare impiegato a partire dalla tarda età Romana¹⁵¹ per la produzione di vasi litici ottenuti svuotando e modellando blocchi di cloritoscisto particolarmente tenero e adatto alla



Macchina per alesare, adatta alle canne di armi da fuoco o tubi in legno o metallo, descritta da Salomon de Caus nel 1615. La struttura materiale è assimilabile a quella di un tornio.

lavorazione. Si tratta anche in questo caso di macchine azionate manualmente che, a differenza del tornio da vasaio, introducono il concetto dell'asportazione di materiale e quindi impiegano un utensile in acciaio temprato montato su un supporto ligneo che il tornitore aziona al fine di modellare opportunamente il manufatto. Del tutto simile a questo è il tornio da falegname, il più delle volte azionato a pedale. A partire dal pieno Medioevo queste macchine vengono meccanizzate con l'impiego di una ruota idraulica, alla stregua delle altre semplici macchine produttive. L'applicazione più importante del tornio all'industria metallurgica riguarda gli impianti per l'alesatura delle bocche da fuoco, anch'esse mosse dall'energia idraulica.

Il tornio parallelo propriamente detto, derivato dalla macchina analoga per la lavorazione del legno, non farà la sua comparsa che sul finire del XVIII secolo, per trovare larga diffusione nel secolo successivo. Le applicazioni e le varianti sono notevoli, ma in linea di massima si può distinguere il tornio per imbutitura da quello per asportazione di metallo. Nel primo caso la macchina viene impiegata per imprimere il moto rotatorio a una lamina metallica che sotto la pressione di un utensile, solitamente ligneo, azionato manualmente, viene modellata su una sagoma di legno con lo scopo di produrre vasi

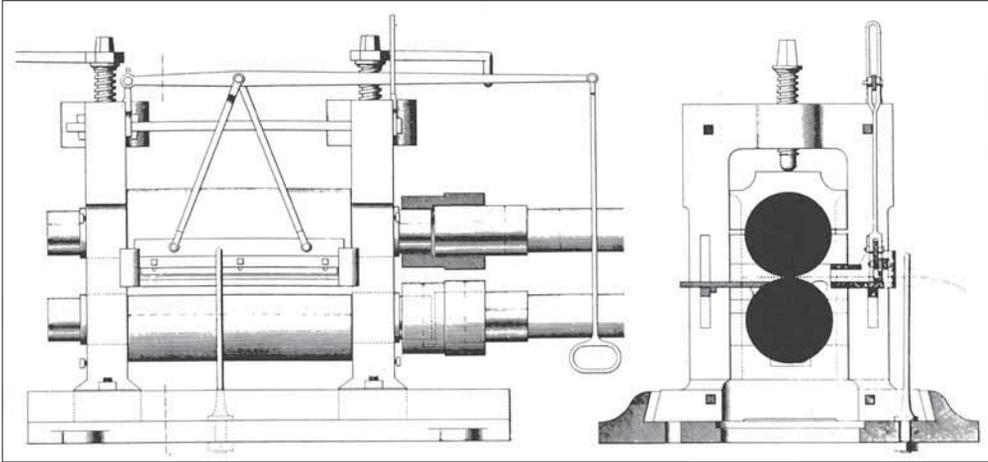
¹⁵⁰ Gordon Childe 1961, p. 198.

¹⁵¹ Va sotto il nome di "pietra ollare" un cloritoscisto particolarmente tenero, molto omogeneo, con il quale a partire dal III secolo d.C. si incominciano a produrre belle forme di vasi da fuoco cilindrici o tronco-conici.

sagomati in maniera aperta. Nel secondo caso l'oggetto da lavorare viene montato sull'albero mediante una pinza concentrica ("mandrino"), quindi con un utensile di acciaio temprato, fissato su un carrello ancorato alle guide si procede all'asportazione di metallo per successivi volumi fino all'ottenimento della sagoma voluta.

Analisi dei documenti

Non esistono testimonianze materiali per gli impianti romani o medievali e in genere



Rilievo di un laminatoio industriale da Métallurgie Pratique du Fer di W. De Sain Ange (1835).

nessuno che si riferisca a macchine medievali. La più antica immagine di un tornio da falegname è quella contenuta in un manoscritto francese del Trecento¹⁵². Si tratta di una macchina a pedale, con una pertica elastica a contrasto e la trasmissione del moto all'albero mediante una fune. Il *Portraitbuk* di Mendel del 1435 propone un'altra variante di tornio da legno per la tornitura dei grani di un rosario. Questa è una macchina di piccole dimensioni simile a un arcolaio, nella quale il moto all'oggetto da lavorare è impartito mediante un archetto azionato manualmente. Sistemi di questo tipo erano diffusi nel Medioevo, soprattutto in prossimità delle chiese importanti, se già nella pianta del chiostro di San Gallo del 820, si trova un'area destinata ai "tornarii"¹⁵³. Un'altra buona illustrazione di tornio a pedali è contenuta nella vetrata della cattedrale di Chartres.

Un disegno interessante di tornio ad arco impiegato per filettare viti di legno si trova nel *Codice Atlantico*¹⁵⁴, anche se la definizione del passo è regolata a mano in maniera empirica. Nello stesso trattato, Leonardo propone una soluzione piuttosto complicata a volano, azionata a pedale mediante un sistema biella - manovella.

Il *De la Pirotechnia* informa circa le macchine per alesare le canne delle armi da fuoco¹⁵⁵, ove si riscontra una struttura materiale tecnicamente simile a quella di un trapano

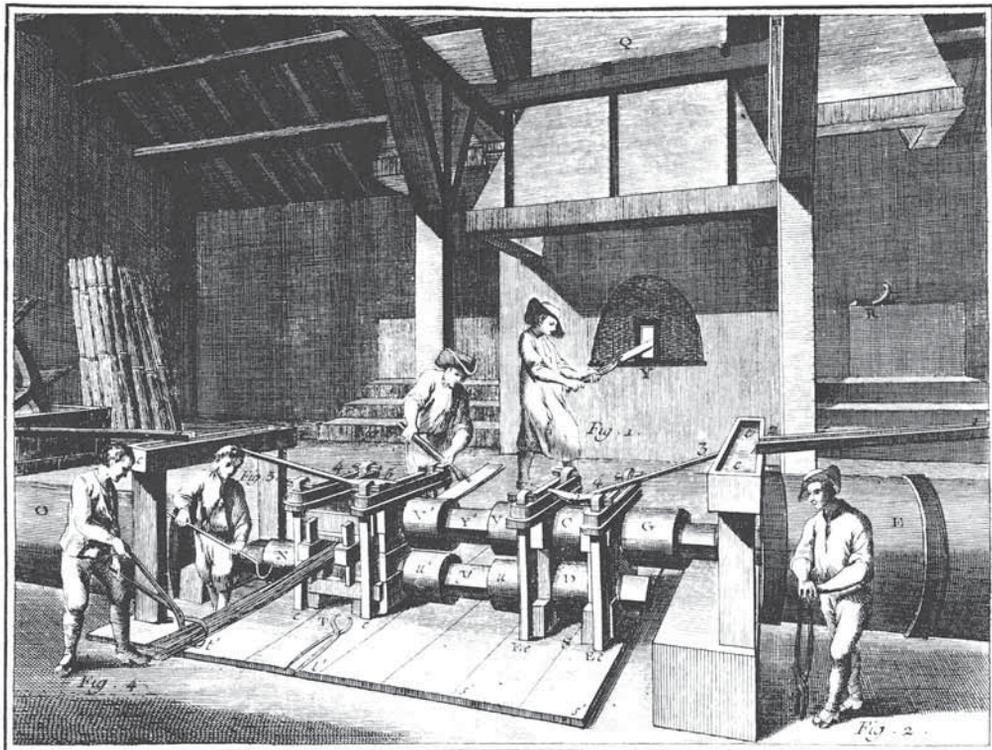
¹⁵² Gille 1972, p. 55.

¹⁵³ Marchis 1985, p. 14.

¹⁵⁴ Gille 1972, p. 188.

¹⁵⁵ Biringuccio 1540, p. 113r e Bayley et al. 2008, p. 60.

in ad asse orizzontale, dal momento che il pezzo da lavorare è fisso e l'utensile, costituito da una lunga punta metallica, ruota. La novità di rilievo è l'azionamento a opera di una ruota idraulica che trasmette il movimento all'utensile ma la struttura del banco, strutturato con guide parallele è sostanzialmente quella del tornio. Un sistema analogo, mosso da una grande ruota del tipo "per di sotto" è illustrata con una buona tavola da Salomon de Caus nel 1615, dimostrando che queste macchine sono in uso almeno dal XVI secolo, quantomeno negli impianti produttivi più evoluti, dove si producono le



Laminatoio e fenderia da una planche de L'Encyclopédie di Diderot e d'Alembert.

bocche da fuoco in bronzo e richiedono l'alesatura interna di precisione. Un secolo più tardi il tecnico inglese John Wilkinson creerà la prima alesatrice moderna.

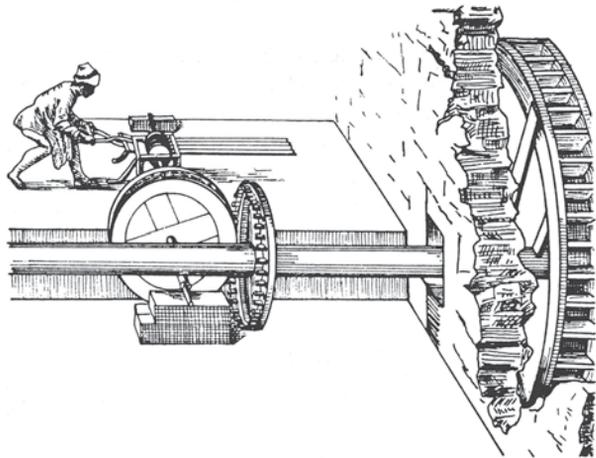
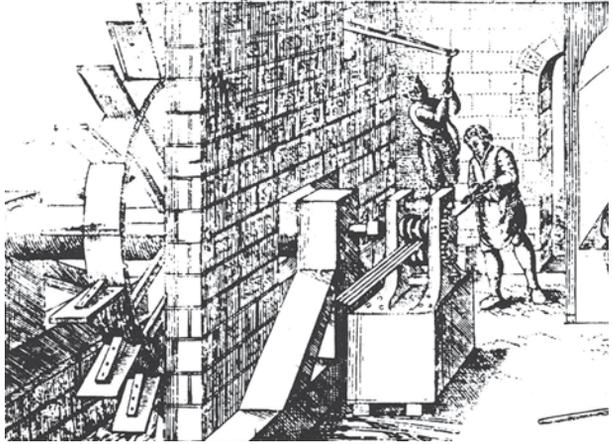
10.9 Altre macchine per la lavorazione del ferro

La lavorazione tradizionale del ferro, nella maggior parte dei casi, come già osservato, avviene per deformazione plastica eseguita mediante martellatura manuale o meccanica (forgiatura). Ciò consente la produzione di manufatti anche molto raffinati, ma con tolleranze dimensionali dell'ordine dei millimetri e una precisione geometrica piuttosto limitata. Esigenze produttive via via più sofisticate, che si manifestano in prevalenza a partire dal Settecento, inducono un'evoluzione consistente nella tecnologia delle macchine per la lavorazione del ferro, caratterizzata da un'articolazione di sistemi sempre più complessi. Se si escludono le evoluzioni del XIX e XX secolo, le macchine

per la lavorazione del ferro possono essere ricondotte a due grandi categorie. La prima è quella tradizionale delle macchine che agiscono per deformazione plastica, quasi sempre a caldo, mentre la seconda comprende la grande famiglia delle macchine ad asportazione di metallo.

Nella prima categoria la macchina che, accanto al maglio, occupa una posizione di rilievo nelle lavorazioni plastiche della nascente industria meccanica, è il laminatoio con il quale è possibile produrre lamiere e profilati di grande precisione. La lavorazione è ancora nel campo della deformazione plastica eseguita a caldo e più raramente a freddo. La differenza rispetto alle lavorazioni tradizionali risiede nella precisione della calibratura. La macchina per la laminazione dei metalli (laminatoio) consiste in una coppia di pesanti rulli metallici di forma cilindrica, ben calibrati, mossi da potenti motori idraulici, le cui distanze relative possono essere regolate mediante appositi sistemi a vite. La lavorazione consiste nello schiacciamento di blumi e lamiere, a caldo, per semplice rullatura. Macchine di questo tipo sono già in uso nel XVIII secolo e in qualche caso addirittura nel XVII o forse a date ancora anteriori, anche se manca la documentazione tecnica e storica. La conferma deriva dalla prima descrizione nota di questa macchina, dovuta a Salomon de Caus del 1615¹⁵⁶.

Una variante del laminatoio è la trancia a rulli detta “fenderie” in francese o “fenderia” nella traduzione in italiano. Si tratta di una macchina ad alimentazione continua, che è strutturata con gli stessi meccanismi del laminatoio azionato da una potente ruota idraulica.



Trancia a rulli (fenderia) dal Premier Livre des Instruments de Mathematique Mécanique” di Jean Errard pubblicato a Nancy nel 1584.

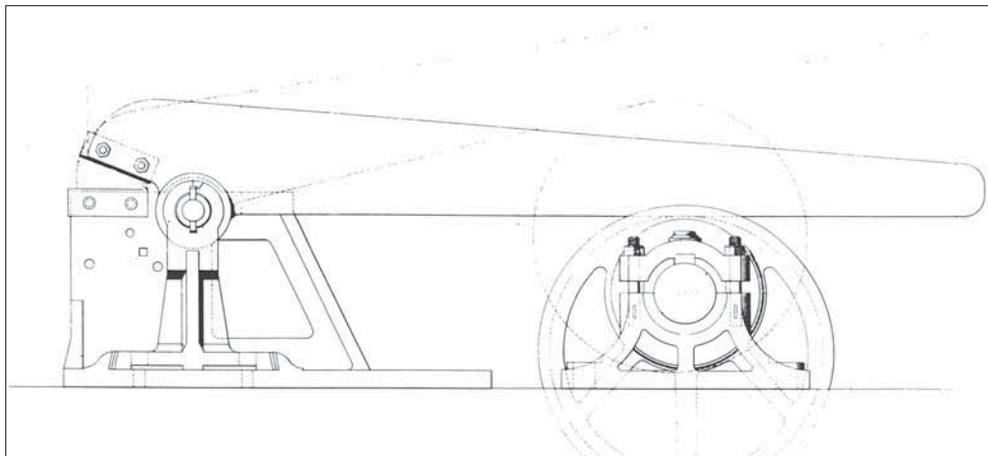
(Sotto) Trancia a rulli descritta dallo Swewdembord nel 1762.

¹⁵⁶ Gille 1970, p. 70.

Analisi dei documenti

Suggestive immagini di laminatoio sono fornite, ancora una volta da Walter De Saint Ange, e riguardano rilievi relativi a numerosi impianti datati ai primi decenni del secolo XIX¹⁵⁷.

Una derivazione diretta del laminatoio per le lastre o lamiere è la trancia a cilindri per la produzione di bandelle (fenderia). Essa differisce dal laminatoio unicamente per la sagoma dei cilindri, che sono scanalati con solchi accoppiati, leggermente interfe-



Trancia a cesoia nei rilievi de La Métallurgie Pratique du Fer di Walter De Saint Ange (1835).

renti, come quella descritta da Jean Errard nel suo “Premier livre des instruments de mathématique et Méchanique” e successivamente da Emmanuel Svedemborg¹⁵⁸.

Nel taglio delle lastre e lamiere vanno considerati anche le cesoie per tranciatura. Trance a cesoia, sia manuali, sia meccanizzate, sono solitamente piuttosto diffuse. Quelle relative alle fucine medievali consistono in meccanismi manuali che agiscono con il principio della forbice. La struttura solitamente prevede tagliente in metallo temprato, fissata a un pesante ceppo e la seconda libera di essere azionata, sia manualmente, sia a pedale. Una categoria di meccanismi a cesoia più pesanti compaiono a partire dalla fine del XVIII secolo e sono meccanizzati, con azionamento abitualmente attuato da un eccentrico, come quello rilevata dal De Saint Ange¹⁵⁹.

Tra le macchine ad asportazione di metallo, oltre al tornio di cui si è trattato, vanno ricordate le fresatrici, le limatrici, i trapani e le segatrici. Nessuna di queste risulta però impiegata prima della fine del XVIII secolo ad eccezione dei trapani di varia foggia di cui si è già accennato.

¹⁵⁷ De Saint Ange 1835, p. 77.

¹⁵⁸ Swedemborg 1762, p. 9.

¹⁵⁹ De Saint Ange 1835, p. 21.

11. DATI PER UN'ARCHEOLOGIA DEI CICLI PRODUTTIVI

Una trattazione completa sulle tecnologie siderurgiche antiche non può prescindere dalla dettagliata ricostruzione dei cicli produttivi che, insieme alle strutture materiali, completano il quadro tecnologico. A questo proposito si possono desumere informazioni dalle evidenze archeologiche soltanto in merito alle grandi fasi, mentre gli aspetti di maggiore dettaglio non sono comprensibili. Conseguentemente la fonte principale per questo capitolo è la documentazione scritta.

I trattati più antichi, pur essendo piuttosto circostanziati a proposito di molti processi produttivi, non riportano dati sufficientemente chiari circa i cicli relativi alla metallurgia del ferro¹. Occorre attendere i secoli dell'età Moderna, per disporre di trattati che descrivano in maniera attendibile i processi di produzione.

11.1 Procedimento diretto

Una delle descrizioni più complete di un ciclo produttivo attinente al processo diretto di riduzione dei minerali di ferro è contenuto nel trattato di Carlo Antonio Galleani Napione² e riguarda il distretto minerario-metallurgico canavesano, con riferimento alle strutture produttive di Brosso in Piemonte.

Egli afferma che *«ogni minatore lascia il minerale che gli appartiene, esposto all'ingresso della miniera per venderlo, secondo la qualità, a coloro che dispongono dei mezzi per fonderlo. Quando i compratori (ferrieri) hanno una quantità sufficiente, cominciano col farlo arrostitire in forni costruiti come i forni per la calce e, dopo questo arrostitimento che fa assumere al minerale un colore rosso³ lo si pesta su una grossa pietra con un martello mosso dall'acqua, e successivamente lo si lava entro fosse ove s'introduce l'acqua attraverso un piccolo canale. Si comprende facilmente la necessità di questo lavaggio, quando osservando il minerale con attenzione ci si accorge che è disseminato di piccoli cristalli di pirite appena visibili... E' opinione diffusa nel paese che il minerale stagionato più a lungo nelle fosse dà un ferro di migliore qualità»*.

La fusione avviene entro i bassi fuochi già descritti⁴. *«Per caricarli si comincia a scaldarli con del carbone, quindi si immettono alternativamente e successivamente due palate di minerale ancora umido e tre palate di carbone. Con questo metodo la calce di ferro si vivifica e, agglutinandosi sotto la tuyère, forma a poco a poco una massa di ferro quasi puro...*

Prima di estrarre la massa dal forno (ciò che si fa tre volte in 24 ore), si fa colare la scoria che si trova al fondo del forno, nel bacino di raccolta. Dopo aver rimosso la

¹ Vedasi ad esempio il trattato di Teofilo.

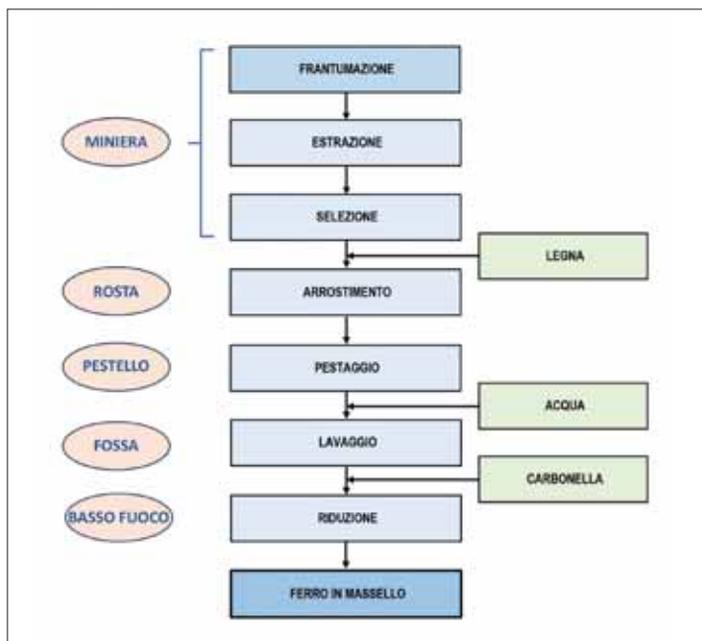
² Galleani Napione 1785, p. 348. (Il testo originale è in francese e qui per maggior comodità è stato tradotto).

³ Ivi, p. 349.

⁴ Ivi, p. 351; v. anche p. 133 in questo volume.

scoria che forma la parte anteriore del forno e, scoperta la massa che si è formata sotto la tuyère, due dei più forti operai l'agganciano con delle lunghe tenaglie, mentre altri gettano dell'acqua e della polvere di carbone sul braciere per limitare il grande calore che può nuocere agli operai.

Quando la massa è fuori dal forno, altri due operai succedono ai primi, la condensano a grandi colpi di martello, facendo uscire una specie di ghisa colante, che si ha cura di raccogliere e che all'affinazione dà un ottimo ferro. Poiché si forma una cavità nella



massa di ferro in corrispondenza della soffiaria, si ha cura di martellarla sul lato opposto, affinché sia più facile, con delle grandi tenaglie, manovrarla sotto al martinetto. Dopo che la massa è condensata, la si taglia a pezzi che vengono forgiati nello stesso forno e quindi tirati in sbarre di 5 rubbi ciascuna. Il ferro è fragile a caldo, come dimostrano le microfrotture che si vedono alla superficie di queste sbarre. Inoltre arruggi-

Ciclo produttivo del ferro al basso fuoco - Processo diretto.

nisce facilmente e contiene della terra della natura della piombaggine...».

Gli Statuti del 1602 della comunità di Brosso⁵ informano sui ritmi produttivi annuali, che sono coerenti con le attività agro-pastorali. Nei mesi di gennaio e febbraio si possono cavare i minerali, mentre il trattamento di riduzione non può avvenire «dalla festa della beata Maddalena fino a che si continueranno comunemente a raccogliere le castagne». Il trattamento di arrostitimento, che è il più critico per quanto attiene all'inquinamento atmosferico, è relegato ai mesi di novembre e dicembre, quando la campagna è a riposo e di conseguenza, da un lato non si verificano interferenze con le attività agricole e dall'altro nelle comunità vi era maggiore disponibilità di manodopera. Peraltro le attività di carattere minerario metallurgico sono una notevole attività complementare rispetto a quelle legate all'agricoltura che occupano la maggior parte della popolazione, e mitigano le pratiche relative alle attività itineranti che nella cattiva stagione conducono uomini e giovani lontano da casa.

⁵ Frola 1918, p. 23.

11.2 Procedimento indiretto

Una documentazione particolarmente preziosa per la ricostruzione del procedimento indiretto è contenuta nel Catastico Bresciano di Giovanni Da Lezze dell'inizio del XVII secolo e negli scritti di Giovan Battista Brocchi della fine del Settecento⁶. La maturità del sistema bresciano-bergamasco è dimostrata dall'assenza di modificazioni sostanziali in un così grande lasso di tempo.

Le uniche differenze riguardano il periodo di attività dei forni che nel Seicento è semestrale, mentre nell'Ottocento diviene annuale. Nello stesso intervallo risulta generalmente sostituito il sistema di ventilazione basato sui mantici grazie alla larga diffusione delle trombe idroeoliche che si manifesta in maniera significativa intorno alla metà del XVIII secolo.

La riprova della sostanziale antichità del processo indiretto bresciano - bergamasco descritto dal Brocchi risiede nelle ripetute deprecazioni dell'autore e dell'altro importante tecnico metallurgico coevo Ermenegildo Pini di questo sistema produttivo al confronto delle tecnologie impiegate in altri distretti produttivi europei⁷.

Giovanni da Lezze⁸, pur non essendo un tecnologo, fornisce la migliore descrizione del ciclo di prodotto siderurgico nota per l'ambiente bresciano-bergamasco, riferibile a un sistema osservato nei primi anni del XVII secolo, ma forse non dissimile da quello tardo-medievale. Egli osserva che i minatori «... Vano a cavar la vena del ferro... di sotto via i monti per cinque o sei miglia, et più con pericolo delle loro vite, portando ciascun d'essi et anco le donne il zerlino tenendo sopra la testa un lusone, che conduce quella persona fino fuori della montagna per fino cinque o sei miglia, com'è detto, et non guadagnano più di un da vinti in circa per ciascuno.

Questa vena cavata dal monte si conduce alle fornase nell'istessa maniera a punto che si cuociono anco le pietre, dalle quali si cava l'istessa vena cotta in pezzetti piccoli.

Et in questo esercizio si esercitano i fornasieri, et operarii de quattro o cinque huomini per fornace, che questi possono guadagnare trenta marchetti al giorno, et in dui o tre giorni si finisce da cuocere.

Et così questa vena doppo cernita et condotta al forno si raffina là entro, et continua il fuoco fino li cinque, et sei mesi, che mai cessa lavorandovi il forno, che serve a tutta la maestranza con duodeci huomini, che guadagnano secondo li esercitii loro, perchè alcuni portano il carbone, altri sollecitano il forno veggiando giorno et notte.

Ogni giorno si cava il ferro purgato, et ogni giorno se ne va mettendo della miniera nova, il qual forno commune si esercita per il tempo delli sei, o sette mesi, et il resto va vacuo, et questo per mancamento della monitione, perchè nel tempo che va vacuo si provvede per il forno venturo».

La durata del ciclo produttivo del ferro è importante poiché indica con chiarezza l'efficienza del mezzo tecnico e la tenuta delle strutture alle sollecitazioni termiche e

⁶ Da Lezze 1973, III, p. 598 e Brocchi 1808, p. 67.

⁷ Frumento 1963, p. 272.

⁸ Da Lezze 1973, p. 598.

alle aggressioni chimico - fisiche sulle pareti. Dati provenienti da diversi distretti italiani dove è attestato il cannechio riportano periodi di "gita" o "gitta" (getto continuo) di circa quattro mesi⁹.

Ancora dal Da Lezze apprendiamo che *«gli operari del forno guadagnano soldi vinti et più, et manco secondo il loro esercitio. Si cava il ferro dal forno et detto ferro si conduce al fuoco grosso, cioè alle fucine»*.

Il Da Lezze in questo passo fornisce un'informazione preziosa per il distretto bresciano-bergamasco. Nel XVII secolo i forni sono delle consorzierie, come risulta anche nei secoli precedenti, ove ogni "particolare" conduce il proprio minerale e trae la ferraccia che poi lavorerà lui stesso o venderà a terzi. Non si può peraltro escludere che vi siano forni provati in attività.

Il "ferro" cavato dai forni della Valcamonica, Val Trompia e Val Sabbia, in effetti è ghisa o - come la definisce il Da Lezze - "ferro sgrezzo".

«Questa massa di ferro sgrezzo si dispensa per diversi edifici di fucine, dove di novo ricola, et da maestri con arte e con il fuoco, et con li magli, che sono martelli grossissimi che battono a forza d'acqua viene disposto in varie forme, et modi, et varii usi, come più distintamente si dirà.

Prima nelle prime fucine si fabbricano li masselli, ovvero cavezzi che sono pezzetti di ferro lunghi mezzo braccio, et di peso, chi d'un peso, chi di manco secondo la grandezza dell'istromento, che si vuol fare, quali masselli si portano poi in altre fucine, dove si dispongono in vari usi come si dirà più a basso.

Primo si fabbrica petti, schene, corsaletti, scudi, o rotelle, essi masselli si portano alle fucine dette scartadore, et ivi si scartano, et riducono a quella forma che si vuole, et poi si vendono, così rozzi a chi li porta nella città di Brescia, dove poi si puliscono et forniscono.

Secondo per far celate, o morioni, si portano essi masselli in altre fucine, dove sono tagliati in pezzi, et battuti si fanno in taglieri tondi, quali poi portati in un'altra fucina a ciò destinata particolarmente e non ad altro, detta l'incanadora (essendovene una sola) s'incavano, et fanosi coppì, quali parimente sono poi portati a Brescia dove sono lavorati, et ridotti a perfettione.

Terzo, per far padelle, et massime di detti cavezzi in altre fucine si formano fondi, o taglieri grandi, et piedi secondo si vuole, quali poi portati in altre fucine s'incavano con li magli, et si formano in padelle, et poi in altre fucine piccole si puliscono, et forniscono, et così fornite si vendono.

Quarto. Di essi cavezzi in altre fucine si fabbrica anco la lamiera stretta et larga, portandosi alle fucine dette scartadore, dove si scartano, cioè si battono con li magli, che vengono larghi, et sottili, così si fa la lamiera qual poi si vende senza farvi altra fattura, et della lamiera si fanno cossali, gambere, brazzali, manopoli, armature da cavallo, et armature da fiasche, et se ne vale anco per far quarte, stara, stardi, fondi di

⁹ Baraldi, Callegari 1991, p. 129.

bilance, stadere, serrature, foderar assi, porte, botteghe, cassoni di ferro, et infiniti altri usi massime per l'agricoltura.

Quinto. Di detti masselli parimente, si fabricano le ranze in questo modo, cioè fatti nelle prime fucine li masselli con azzale in altre fucine con l'ajuto del fuoco, et d'alcuni instrumenti si travagliano, et si accomodano in diversi pezzi, quali poi porti nelle fucine scartadore si scartano et riducono in forma di ranze, indi poi in altre piccole fucine si poliscono et forniscono...

Sesto. Dal ferro sgrezzo parimenti si formano nella prima fucina masselli, overo cavezoli per far mazze, cioè vomeri per li aratri, quali poi portati alla seconda fucina detta scartadora si scartano, et si riducono in forma di vomeri et in dette mazze, et così poi si vendono.

Settimo. Di essi masselli si forma ancora l'acciaio di più sorti, qual serve per far armi di taglio, et altre cose, et di questo se ne fabrica assai in essa valle, et in molte fucine.

Ottavo. Di detto ferro sgrezzo in molte fucine si fabricano anco cerchi da botti, et cadì, cioè cerchi per rode da carro, carrette et carrozze.

Nono. Di detto ferro sgrezzo si fabricano bachette di ferro per far ferrate, et feradori et simili.

Decimo. Parimente in molte fucine si fabricano spazze per far ferri di cavalli, et fassi di reggia. Per far chiodi, et diverse ferramenta per l'agricoltura"¹⁰.

A Gardone, in Val Trompia, le fucine sono specializzate nella costruzione di canne d'archibugio. Qui, nel "...fuoco grosso... (si) forma la lama, la quale così formata si porta poi alle fusine piccole, dove detta lama si riduce nella canna dell'arcobuso.

La qual canna, così ridotta casca poi in mano di un'altra maestranza, che trivella di dentro per dove si pone la balla.

Dopo casca in un'altra maestranza, che si chiama livelladori, o drezzadori, che hanno cura di drizzar, et livellar la canna et il buco di essa.



L'Armoraro, fabbricante di armi e corazze, dipinto olio su tela di Gabriël Metsu (circa 1650-1660; conservato al Rijksmuseum di Amsterdam.

¹⁰ Da Lezze 1973, III, p. 599.

Et dopo questa casca in mano d'un'altra maestranza che ha carrico di metterli il vidone di dietro, senza il qual vidone la canna non varrebbe niente.

Doppo questa casca in un'altra maestranza chiamata le moladore, le quali moladore abbelliscono la canna de fuora via, senza la qual moladura la canna non sarebbe di bella vista.

In oltre casca in un'altra maestranza la quale si chiama il fornidore, che hanno carrico di metterli la mira, il fogone, et il coverchietto con il suo buso appresso la ruoda dove entra il fuoco.

Dopo le quali cose vi entra poi altre maestranze per la cassa, serpa, stampa da balla, sguardori et vide, che tutte queste cose riescono ai maestri et operarii particolari et perciò nel fabricar queste canne vivono, non si può dir molti, ma tutti di quelle parti con utile di trenta in quaranta marchetti al giorno secondo li suoi eserciti»¹¹.

Il Catastico Bresciano è anche particolarmente preciso per quanto attiene ai processi tecnologici dell'industria spadaria, ove sostiene che "si sostentino più di mille persone" e che riteniamo di dover riportare in sintesi per completezza¹². «Le lame delle spade si pagano sotto sopra una giustina l'una, ma quelle di Bergamasca non si pagano tanto per esser anco azzalate. Quelli di Bergamasca comprano l'azzale a Bagolino ...

Il primo maestro è quello che le smeria con una moladora di legno ... Et queste smeriadure sono quelle che cavano quella rospidezza che riceve l'arma dalla prima mola... Poi si conducono a Brescia e si fanno colorir da un altro maestro per finirla et lustrarla compitamente, et queste sono le spade piane senza incavadura.

Si fa poi un'altra arma dell'istessa sorte, ma incavata a traverso et di queste si pagano fino 12 in 13 gazette l'una per farle intraversare et incavare come s'è detto. Alle quali armi come di sopra vi concorrono altri maestri per li fornimenti.

Dopo cascano in mano de altri maestri in Brescia et fuori, i quali limano detti fornimenti che restano bianchi di lima... Vi sono poi altri maestri che dopo limati li adornano di finezza et bianchezza, o colorati d'osso, come negro et ancora altri maestri che adornano et argentano...

Altri maestri che camuzzano dette armi ... cioè che li formano dentro figure...

Vi sono maestri che fabricano solamente i pomoli ... et altri maestri fabricano fornimenti da pugnali, daghe, stilli, coltelle et simili. Altri fanno li manichi, et altri li fodri, altri vere d'attacar pugnali et pontalli. Altri maestri fanno soltanto pontalli... Altri si esercitano nel far alabarde».

Il Da Lezze conclude rimarcando le diverse fasi: «il ferraro fa l'arma al foco et martello», vi è quindi «il molador. quelli che fanno il fodro, quelli che fanno le vere e i pontali, un altro il manico, et l'ultimo maestro è quello che finisce l'arma di tutto ponto»¹³.

La storia della siderurgia non è priva di tentativi di condurre il processo di produzione del ferro direttamente all'altoforno, con un ciclo diretto, evitando la rifusione nell'af-

¹¹ Da Lezze 1973, III., p. 634.

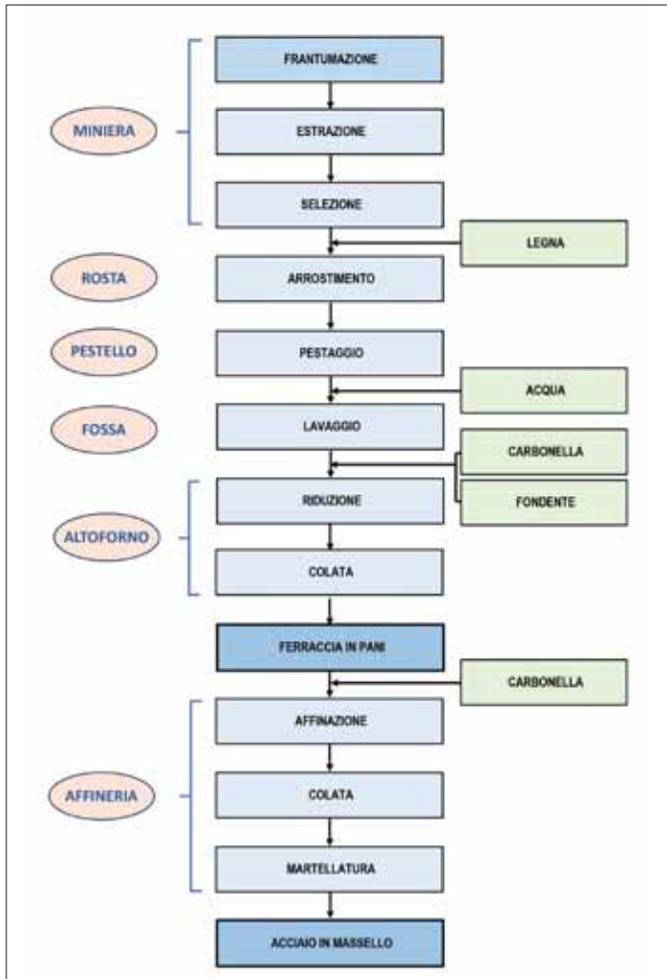
¹² Ivi, p. 189.

¹³ Da Lezze 1973, p. 191.

fineria. A questo proposito riferisce con buon dettaglio il de Buffon¹⁴ il quale conduce diversi esperimenti nelle sue ferriere di Montbard. Egli modifica la marcia del forno “*facendo soltanto fondere la miniera ad un fuoco lungo e graduato*”¹⁵, ottenendo la decarburazione della ghisa direttamente, facendola permanere più a lungo nel crogiolo dell’altoforno. Si tratta in questo modo di un’anticipazione della tecnica di affinazione al cubilotto che verrà messa a punto nel corso del XIX secolo.

Più preciso per quanto attiene alla marcia dell’altoforno, ma privo di spunti per le successive lavorazioni del ferro e per le produzioni è il «*Trattato mineralogico e chimico sulle miniere di ferro del dipartimento del Mella*» di Giovan Battista Brocchi¹⁶.

Questi riferisce che «*divisa la vena è destinata pel forno, ma prima della fusione soggiace ad un’operazione preliminare che è l’arrostimento. Si frange a tal fine in pezzi, che non eccedono a un di presso il volume di un uovo, si separa possibilmente col martello il materiale inutile, che è o la matrice argillosa o il quarzo, o lo spato pesante, detto marmoro, e si versa in fornaci... che diconsi regane. Compiuto l’arrostimento si prepara il minerale in più minuti frammenti della grossezza presso a poco di una noce, il che può eseguirsi con assai*



Ciclo produttivo del ferro con procedimento indiretto nel cannechcio bresciano.

maggior facilità che quando era crudo, e più esattamente si purga dalle parti pietrose: operazione esercitata da uomini giornalmente pagati, detti gli intassatori. Qualora sia vi necessità di servirsi immediatamente della vena abbrustolita, si lascia per qualche

¹⁴ de Buffon 1779, p. 55.

¹⁵ Ivi.

¹⁶ Brocchi 1808., p. 79.

tempo esposta all'intemperie, dove, secondo il detto degli operai, si matura e diventa più ricca. L'effetto di questa maturazione riducesi probabilmente all'asportazione delle parti terree, e leggere, mediante l'acqua delle piogge, o di quella di una fontana, che vi si fa cadere sopra a zampilli.

Allestita che sia la vena per la fusione, riempiesi il forno di carboni, che si accendono al soffio di trombe idroeoliche, di cui parleremo in appresso, e lasciassi così per tutta la giornata a fine di riscaldarlo, e di asciugarne l'umidità: si versa nel dì susseguente



Forgiatura di un massello al maglio terminale nella fucina Gaddò a Oglianico in Canavese (Torino), rimasta in funzione fino ai primi anni del XXI secolo.

una piccola quantità di minerale con la consueta misura di nuovo carbone. La dose del minerale si va di mano in mano aumentando, ma prima che il forno possa portare tutta la carica di cui è capace, scorrono molte settimane. Durante questo spazio di tempo il maestro del forno fa le maggiori prove della sua abilità onde prevenire o rimediare agli inconvenienti, che potrebbero sconcertare un'operazione tanto importante, restando ordinariamente acceso il forno senza intermittenza per tutto il corso di un anno. Spetta ad esso di regolare la forza del vento, di esporre all'azione del fuoco la quantità di minerale opportuna nelle diverse circostanze, e di mescolare le vene che scambievolmente si servono di fondente...

Le cariche del minerale, supponendo che il forno travagli senza intoppo, si ripetono di due in due ore, e nel tempo istesso si versa due rasi di carbone, che corrispondono a 24 pesi. Ciascheduna carica di vena è comunemente di 12 in 14 quarte, e rimane tra

i carboni prima di fondersi 24 ore all'incirca. La quarta poi è una misura di ferro alta sei oncie e mezzo e del diametro di cinque e mezzo. Si ripete la carica quando l'antecedente è discesa per sue braccia di sotto del bastardo, il che si riconosce con un ferro ricurvo chiamato il saggiatore. Ad ogni due o tre ore si apre l'uscita al ferro liquefatto; ma il tempo di questa operazione è variabile a norma, che la fusione più o meno regolarmente succede».

Molto interessante è anche la descrizione che fornisce il De Saint Ange¹⁷ a proposito dell'avvio di un altoforno a carbone di legna: «Quando tutto è pronto e il forno è pieno a metà di combustibile, si comincia a caricare minerale e fondente fino a riempire il forno nello spazio di tre giorni al più, seguendo la progressione successiva:

primo periodo - minerale 1/6 circa del peso della carica in combustibile; fondente. 2/3 circa del peso del minerale;

secondo periodo - minerale 1/5 del combustibile; fondente 3/5 del minerale;

terzo periodo - minerale 1/4 del combustibile; fondente, 1/2 del minerale;

quarto periodo - minerale 1/3; fondente 1/3;

quinto periodo - minerale 1/2; fondente 1/3;

sesto periodo - minerale 2/3; fondente 1/3».

Il Brocchi descrive molto bene la composizione della manodopera che agisce intorno al forno¹⁸. «Otto uomini sono addetti al servizio del forno. Un maestro, un sottomaestro, o discente, il discentino, un pestaloppe, due braschini, e due ministratori¹⁹ del carbone.

Il primo ha la sopravveglianza generale su tutto quello che riguarda la fusione, ed a lui spetta principalmente il regime del vento.

Il discente è continuo assistente del maestro, fa le sue veci in caso di assenza e principalmente la notte.

Il discentino è assistente del discente, e devono ambidue tradurre la vena dal magazzino al forno.

Il pestaloppe si occupa di frangere le scorie sotto il maglio per ricavarne la granaglia di ferro.

I ministratori del carbone hanno l'incombenza di versare nel forno il carbone e la vena.

I braschini sono due servitori che assistono ad ogni cosa.

Tutti questi operai lavorano di concerto quando si abbassa il fettone.

Gli avanzamenti di posto si succedono con quella disciplina medesima, che osservasi nella milizia. Il braschino dando saggi di abilità può essere promosso al grado di discentino, indi a quello di discente, e finire col diventare maestro».

Circa due secoli prima, nel 1609, Giovanni Da Lezze²⁰ osserva che nei «*dui forni da ferro del commun di Bagolino per ciascun de' quali si consummano sachi 30 di carbone*

¹⁷ Da intendersi "somministratori".

¹⁸ Brocchi 1808, p. 78.

¹⁹ Ivi, p. 78.

²⁰ Da Lezze 1973, p. 605v.

al giorno, lavorando per ogni forno dieci huomini, con premio ai ministri de un ducato al giorno, et a gl'altri di dui berlingotti...»²¹.

La differenza tra l'altoforno bresciano-bergamasco e i più moderni altiforni a carbone di legna si coglie anche nel trattato del De Saint Ange²², secondo il quale per ogni unità produttiva sono necessari quasi il doppio di operai. «*Per servizio di un altoforno sono necessari, due fonditori, due aiuti fonditori quattro caricatori e da quattro a otto manovali per preparare le materie e portarle alla bocca di carico. Negli altiforni a coke*



L'ambiente caotico di una ferriera ottocentesca operante nell'industria pesante del ferro nel dipinto "La Forgia" di Menzel Adolf Friedrich (Olio su tela 158x254 cm), datato 1875 - Alte Nationalgalerie di Berlino.

sono necessari due aiuto-fonditori e due caricatori in più».

A riguardo della produzione il Brocchi osserva che un forno può dare 170 pesi di ghisa al giorno²³, pari ad un prodotto annuo di circa 62.050 pesi. Inoltre, l'osservazione del Da Lezze fornisce anche informazione sul reddito di un forno bresciano-bergamasco (cannecchio). «*Affittandosi detto forno di giorno in giorno dal Comune per L. 20, hora più et manco all'incanto che si fa quotidianamente et l'hora s'intende un giorno intiero, et una notte per ciascun forno»²⁴.*

Secondo il De Saint Ange la produzione di un altoforno a carbone di legna è di 4 t di ghisa ogni 24 ore e, dei minerali mediamente fusibili, egli sostiene che rendano dal 35 al 50%²⁵. Inoltre stima un consumo di carbone pari a circa il 120% della ghisa prodotta.

²¹ Brocchi 1808, p. 72.

²² De Saint Ange 1835, p. 138.

²³ Brocchi 1808, p. 85.

²⁴ Da Lezze 1973, p. 605v.

²⁵ De Saint Ange 1935, p. 140.

12. CONCLUSIONI

Il ferro entra lentamente nello strumentario delle comunità umane e con notevole ritardo rispetto ad altri metalli, in una certa misura, più nobili. Gli uomini del calcolitico e ancora di più quelli dell'età del Bronzo impiegano spesso il metallo per imitare i corrispondenti manufatti in pietra, legno e osso al fine di produrre oggetti preziosi, destinati soprattutto alla decorazione e all'abbigliamento. Le prime asce di metallo o le prime lame in rame, oro o bronzo riprendono le forme degli strumenti di pietra, senza raggiungere la stessa funzionalità. Questi manufatti sono destinati ai settori elitari delle comunità umane e quindi sia il loro valore, sia la praticità nell'impiego sono qualità secondarie rispetto a quelle estetiche. Viceversa il ferro è il metallo delle applicazioni funzionali, maggiormente deperibile e complessivamente di qualità estetiche inferiori, ma, pure con una tecnologia più sofisticata, adatto ad essere lavorato con buoni risultati tecnici.

Il ferro grazie anche alla sua grande diffusione sulla crosta terrestre, consente la produzione di strumenti a costi più contenuti e soltanto con il suo sfruttamento intensivo gli oggetti metallici escono dalla sfera dei corredi principeschi per trovare più larga diffusione, almeno in una certa misura, presso i livelli sociali più bassi.

Quest'ultimo aspetto può in parte spiegare la grande fortuna che questo metallo conosce, rispetto agli altri impiegati nella Preistoria, soprattutto a partire dall'età Ellenistica e ancor di più da quella Romana, quando i corredi materiali via via si arricchiscono di particolari. Il ferro diviene il metallo più diffuso perché il suo costo, in termini strettamente economici, è di gran lunga inferiore a quello degli altri metalli noti presso le comunità antiche e le caratteristiche tecniche, grazie a sistemi di produzione sempre più sofisticati, sono decisamente buone.

La siderurgia, già nell'Antichità, rappresenta il ramo più ricco di tecniche e di procedimenti materiali della grande famiglia metallurgica e questo aspetto viene esaltato dall'evoluzione delle comunità umane, fino a raggiungere, nel pieno Medioevo, un significato economico di grande rilievo.

I detentori delle conoscenze metallotecniche occupano ruoli importanti presso le comunità umane di ogni epoca. Questi ruoli sono tanto più elevati quanto più arretrate culturalmente sono le comunità umane che li esprimono. Così, presso le popolazioni barbariche i metallurgisti rientrano nella casta degli arimanni. Nelle comunità medievali gli stessi scadono a livello di membri delle corporazioni borghesi, per cedere progressivamente il passo al ruolo di notevole prestigio e resa economica dei primi industriali, nel senso moderno del termine, quando nel Rinascimento europeo i mercati definiscono la formazione di vere e proprie forme produttive che preludono allo sviluppo industriale. Ciò che distingue questi uomini, soprattutto quelli più antichi, nella società del loro tempo, sono le conoscenze che crediamo trasmesse con molta cura e forse

12. Conclusioni

con grande parsimonia al fine di non perderne i privilegi. Nelle società primitive africane i metallurgisti mantengono ruoli elevati fino al XIX - XX secolo e addirittura i sovrani dimostrano al popolo di essere dei bravi metallurgisti e fabbri.

Prima del Settecento la metallotecnica si impara "a bottega" e le conoscenze consistono esclusivamente in nozioni pratico-empiriche acquisite per affiancamento e imitazione, che vanno dalle tecniche di costruzione dei mezzi di produzione, ai trattamenti delle materie prime, fino ai sofisticati trattamenti termici e superficiali. Sulla loro trasmissione incidono in maniera determinante le strategie familiari e forse di villaggio o di piccola comunità, non completamente chiarite e di cui abbiamo una buona documentazione in molti distretti medievali europei. Spesso i siderurgisti itineranti, anche agenti in distretti molto lontani fra loro si conoscono e si raccomandano vicendevolmente e spesso agiscono secondo linee familiari precise che denotano circoli chiusi di tramando delle conoscenze.

Soltanto il grande fermento ideale e culturale del XVIII secolo condurrà all'istituzione delle prime scuole di metallurgia ad opera delle amministrazioni statali preoccupate di dominare completamente, sul piano tecnico e produttivo, il più importante degli elementi strategici per la sicurezza e la potenza dello Stato.

In tutte le epoche i siderurgisti, alla stregua degli altri metallurgisti, sono uomini che, grazie alle conoscenze di cui sono depositari, godono di maggior libertà. Essi possono spostarsi con una certa facilità, nella Preistoria come nel Medioevo. In qualche misura i metallurgisti calcolitici, che nel breve spazio di pochi secoli nel corso del IV millennio diffondono la metallurgia del bronzo nell'intero continente europeo, sono uomini non radicalmente dissimili dai "pratici" medievali che trasferiscono sistemi tecnici e conoscenze da un distretto all'altro favorendo la diffusione delle più avanzate soluzioni tecnologiche. Di questi ultimi ci offre una traccia suggestiva il maestro bergamasco Giarda che negli ultimi anni del XV secolo sente il bisogno di disegnare l'intero strumentario del forno a canecchio, recentemente costruito a Fornovolasco in Garfagnana, forse per sua memoria personale o forse per maggiore illustrazione all'ignoto fabbro chiamato a costruirlo. Uomini come questi, nei distretti produttivi tedeschi, italiani o francesi anticipano, a partire dal XVI secolo, quelle esperienze tecnico-organizzative che sentiranno all'Europa la grande avventura continentale della Rivoluzione Industriale.

Sul piano strettamente archeologico possono essere significative alcune considerazioni relative ai reperti provenienti dai processi produttivi del ferro. In primo luogo vale una considerazione di carattere generale concernente la distinzione fondamentale tra ferriera e fucina, poiché non sempre viene correttamente valutata nei contesti di scavo, incorrendo talora in spiacevoli errori. In generale i contesti produttivi del ferro si presentano con un'abbondanza di scorie di varia natura e morfologia e nel merito occorre considerare che nelle fucine antiche, dove le lavorazioni erano esclusivamente di forgiatura, non si producevano scorie con fasi metalliche fuse ma unicamente ammassi

di ossidi dovuti al ripetuto riscaldamento del metallo che nella maggior parte dei casi si presentano in forma di sottili lamelle. Queste nei depositi archeologici solitamente sono state digerite dal terreno lasciando nel sedimento labilissime tracce arrossate e qualche grumo scuro tendente a sfarsi.

Considerando che normalmente è difficile in scavo riconoscere le strutture dei forni e soprattutto distinguere tra le varie tipologie di basso fuoco a catasta semplice, a pozzetto oppure a camino, dove peraltro le parti in elevazione non sono conservate (cfr § 3 e § 8), qualche informazione si può ottenere attraverso l'osservazione delle scorie.

Il principio generale a cui attenersi nella conduzione dello scavo in cui si rinvergono delle scorie ferrose di varia foggia è quello di considerare la presenza di resti di un sistema produttivo metallurgico, verosimilmente riferibile alla riduzione dei minerali di ferro in metallo. Relativamente a questa categoria di reperti diversi studiosi si sono concentrati sul tema e sono oggi disponibili piccoli atlanti di riferimento che consentono una prima classificazione dei materiali in base alle caratteristiche morfologiche, in relazione alle differenti fasi del processo produttivo, ovvero ai diversi contesti di formazione. In secondo luogo va segnalato come sia piuttosto facile confondere le scorie provenienti dal processo di riduzione al basso fuoco con il minerale arrostito ma anche scambiare per scoria il blumo spugnoso derivante dal processo al basso fuoco. In questo caso, piccole porzioni separate dalla massa principale durante le fasi di condensazione mediante martellatura non sono distinguibili dagli altri materiali provenienti dall'area del focolare, mentre il blumo nella sua interezza presenta caratteristiche massicce piuttosto precise. Per contro, va osservato che nei resti delle fucine, ove non siano avvenuti processi di riduzione del minerale in metallo non si sono prodotte scorie con fasi liquide. Unicamente il deposito nel terreno potrà presentare superfici e strati arrossati in conseguenza dell'accumulo di ossidi di ferro e all'azione del fuoco di forgia e al più piccole scaglie lamellari grigie con varie tonalità¹, o minuscole porzioni metalliche, le quali il più delle volte si manifestano come semplici grumi di ossido arrossato.

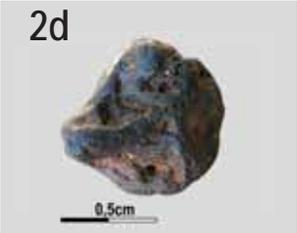
Provando a formulare una classificazione dei tipi di scorie provenienti dal processo di riduzione dei minerali di ferro e dei trattamenti dei masselli semilavorati con processi di fucinatura a caldo si possono riscontrare le varietà descritte qui di seguito in funzione della loro provenienza, tutte caratterizzate dalla dominanza di silicati metallici.

Fornace di arrostitimento o ambiente della fonderia

1. Il processo di arrostitimento conduce alla produzione di blocchetti che è facile confondere con le scorie derivanti dal processo di riduzione ma possono essere distinti in base a un'accurata osservazione della morfologia:
 - a. Si tratta di modesti ammassi grumosi informi di dimensioni normalmente non eccedenti 10-15 cm, fortemente fessurati, con superfici scabre, di colore grigio opaco, localmente tendenti al rosso cupo; hanno peso specifico del tutto simile a quello del minerale proveniente dal contesto minerario.

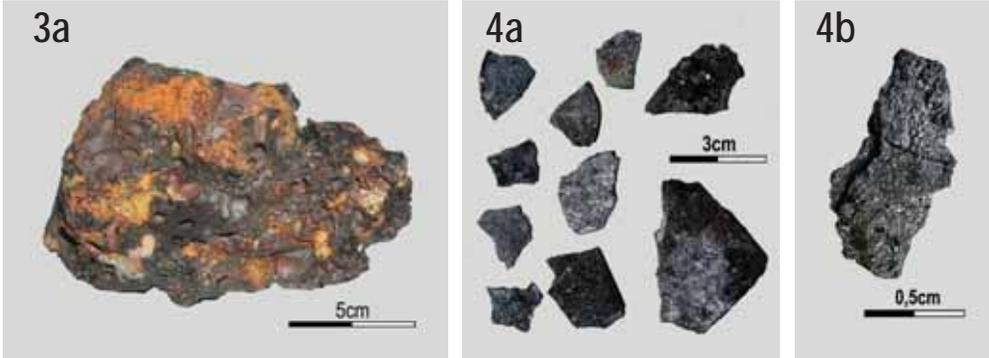
¹ Busana, Bernardi 2018, p. 413.

12. Conclusioni



Basso fuoco a catasta, a pozzetto o a camino nell'ambiente della fonderia

2. Il processo di riduzione al basso fuoco produce scorie classificabili con una certa precisione in base alle caratteristiche superficiali e strutturali:
 - a. Scorie della parete o del fondo del basso fuoco, consistenti in ammassi tabulari, spesso lenticolari concavi, nei quali talora è facile individuare una stratificazione dovuta all'accumulo di livelli in tempi successivi con il reiterarsi dell'uso dell'impianto. La struttura contiene vacuoli dovuti alle



Tipologie di scorie e materiali ferrosi dai contesti produttivi del ferro.

Pagina a fronte: 1a Ematite di Brosso arrostita prima dello sminuzzamento; 2a Scoria stratificata del fondo di basso fuoco; 2b Scorie bitorzolute da basso fuoco; 2c scorie liquide da forno a manica o altoforno a carbone di legna; 2d scoria globulare da condensazione del blumo; 2e Blumo da un piccolo basso fuoco; 2f Scorie aderenti al terminale della tuyère; 3a Scoria da affineria; 4a scorie lenticolari da fucinatura; 4b scheggia metallica da fucinatura. (I reperti 2a e 2e provengono dalla ferriera altomedievale del castrum di Belmonte).

emissioni gassose, piccole inclusioni di frammenti litici e residui carboniosi, oltre a porzioni di argilla concotta. Il colore dominante è grigio opaco con plaghe color arancio;

- b. Scorie bitorzolute con forme disparate, di dimensioni solitamente non eccedenti 8 - 10 cm, formate da una fase liquida solidificata ben riconoscibile, corrispondente al bagno che si forma intorno al blumo di ferro agglutinato sul fondo del basso fuoco. Contengono fasi metalliche e il colore dominante è ancora il grigio, talora con plaghe marroni da ossidi e parti fluenti opache. Anche in questo caso talora vi sono inclusioni di varia natura, tra le quali anche residui di carbone e fasi metalliche piuttosto compatte;
- c. Scorie formate da una consistente fase liquida, colata e solidificata a strati, di forma appiattita, normalmente di peso specifico inferiore rispetto a quelle descritte ai punti precedenti. Il colore dominante è grigio, localmente lucente, con struttura alla frattura spugnosa con grandi vacuoli; possono anch'esse contenere inclusioni, normalmente limitate a minuscole porzioni carboniose annidate, da struttura produttiva con consistente fase liquida (basso fuoco a camino, forno a manica o altoforno a carbone di legna);
- d. Piccole o piccolissime scorie globulari formate durante la condensazione

del blumo metallico spugnoso mediante percussione violenta all'incudine dopo l'estrazione dal forno. Si presentano come minuscole morfologie sferoidali della dimensione di qualche millimetro; raramente centimetriche; sono solitamente leggere, di colore dominante grigio-marrone:

- e. Il blumo metallico spugnoso prodotto nel basso fuoco, perso o abbandonato dal metallurgista a causa della cattiva riuscita del processo di riduzione, si presenta quasi sempre come una massa compatta di dimensioni omometriche, con superficie spugnosa irregolare e una consistente fase metallica che lo distingue per via del maggior peso specifico rispetto alle scorie. La superficie normalmente è intercalata da nidi di varie dimensioni di scoria di natura silicea e di accumuli carboniosi. Talora il manufatto mantiene sommariamente la sagoma del fondo del forno nel quale è stato prodotto;
- f. Il terminale della Tuyère fittile quasi sempre è incrostato di scoria. Di conseguenza il reperto si presenta come un ammasso di terracotta localmente vetrificata con leggeri strati di scorie metalliche incrostanti, di colore grigio opaco talora lucente e nella struttura in qualche caso si nota la fistola.

Affineria per la produzione di acciaio

- 3. Il processo di affinazione della "ferraccia" (ghisa greggia), condotto nei tradizionali forni a pozzo sin dal XV secolo, alimentati da carbone di legna forte, produce scorie differenti rispetto a quelle del processo di riduzione del minerale:
 - a. Si tratta di ammassi colati, fortemente vacuolati e mediamente di peso specifico inferiore rispetto a quelle provenienti dai bassi fuochi, con struttura vacuolata, di colore grigio opaco e plaghe arrossate.

Fucina per la forgiatura di manufatti in ferro

- 4. Il processo di fucinatura genera scorie superficiali nel massello oggetto di lavorazione, a causa dei ripetuti riscaldamenti al fuoco della forgia che, con l'esposizione alla fiamma mantenendo le superfici all'aria libera, conduce la massa metallica a temperature elevate:
 - a. Si tratta di strutture lamellari, talora molto sottili, generalmente non eccedenti il millimetro di spessore, di dimensioni contenute (dal diametro massimo di qualche centimetro) estremamente fragili e tendenti a sfarsi. Sono di norma leggere, di colore grigio scuro con plaghe rosso scuro. Il loro stazionamento nel terreno spesso le conduce alla digestione pedogenetica lasciando una semplice impronta rubefatta nel sedimento;
 - b. Schegge metalliche informi prodotte durante la percussione nelle fasi di forgiatura, per distacco accidentale di piccole parti superficiali dal massello a causa della condensazione imperfetta del semilavorato. Si presentano in forme tabulari di colore grigio scuro opaco, a seconda del sedimento che le conteneva, possono essere fortemente arrossate.

Note bibliografiche

- ABRATE M., 1958, L'industria metallurgica in Europa nella prima metà del XIX secolo - una valutazione piemontese, Torino.
- ABRATE M., 1961, L'industria siderurgica e meccanica in Piemonte dal 1831 al 1861, Torino.
- AGRICOLA G., 1563, De Re Metallica, (tradotto dal tedesco da Michelangelo Fiorio), Firenze.
- ANCEL B., FLUK P., 1988, Une exploitation minière du XVI siècle dans les Vosges-Le filon Saint Louis du Neuenberg (Haut-Rhin) Caractères et évolution, in "Documents d'Archéologie Française, n.16", p. 7-122.
- ARBMAN H., 1969, I Vichinghi, Milano.
- ARRIBET-DEROIN D., 2012, Hauts fourneaux et forges dans les paysages peints du XVIe siècle, in "Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques", p. 27-49.
- Avery D. H. - Van der Merwe N. J. - Saitowitz S., 1988, The metallurgy of the iron bloomery in Africa, New York.
- AYLEY J., CROSSLEY D., PONTING M, 2008, Metals and Metalworking .A research framework for archaeometallurgy, London.
- BALDRACCO C., 1847, Raguaglio sulle usine Catalano liguri e sui vantaggi ottenuti recentemente dalla fiamma perduta nelle medesime, Torino.
- BAYLEY,J., CROSSLEY D., PONTING M., 2008, Metals and Metalworking. A research framework for archaeometallurgy, in "The Historical Metallurgy Society", p. 1-79.
- BALLY MAITRE M. C., 1986, Mines et métallurgie au Moyen Âge. Le site de Brandes-en-Oisans (Huez, Isère), XIIIe-XIVe s. Etude historique et archéologique, in "Actes du Colloque Mines et Métallurgie en Gaule et dans les Provinces Voisines", p. 297-306.
- BALLY MAITRE M. C., 1989, Un coron du Moyen Age, le site de Brandes-en-oisans, (Huetz - Isère) - Anjou.
- BALLY MAITRE M.C., PLOQUIN A., GARIOUD N.. 2001, Le fer dans les Alpes du Moyen Âge au XIXe siècle, in "Actes du colloque international de Saint-Georges-d'Hurtières", p. 164-198.
- BARALDI E., 1979, Lessico delle ferriere 'catalano - liguri', fonti e glossario, in "Quaderni del Centro di Studio sulla Storia della Tecnica n. 2", p. 3-215.
- BARALDI E., CALLEGARI M., 1977, Altoforno e basso fuoco nella siderurgia ligure del XV sec., in "Quaderni del Centro di Studio sulla Storia della tecnica n. 0", 14-20.
- BARALDI E., 1984, La notificazione sopra i negozi de' ferramentie delle ferriere di Domenico Gaetano Pizzorno padrone di ferriere a Rossiglione nel XVIII secolo, "Quaderni del Centro di Studio sulla Storia della tecnica n. 10", p. 4-20.
- BARALDI E.M. CALEGARI, 1991, "Fornaderi" bresciani (XV- XVII sec.), in "Dal basso fuoco all'alto forno - atti del I simposio Valle Camonica 1988 'La Siderurgia nell'Antichità", p. 127-152.
- BARROUL G., GOURDIOLE R, 1982, Les mines antiques de la haute vallée de l'Horb (Hérault), in "Mines et fonderies antiques de la Gaule", p. 79-94.
- BARTOLOMEI M. T., 1977, La ferriera di Ferrari di Voltaggio (sec. XVIII), in "Quaderni del Centro di Studio sulla Storia della tecnica n. 1", p. 39-53.
- BAUTIER H., 1960, Notes sur le commerce du fer en Europe Occidentale du XIII au XVIesiècle, in "Revue d'Histoire de la Siderurgie 1-4", Nancy, p. 7-35.
- BECK L., 1895, Die Geschichte des Eisens. Bd. 2: Das XVI und XVII. Jahrhundert, Braunschweig.
- BELHOSTE J.F., 1991 (A), Implantation d'una sidérurgie bergamasque en Dauphiné au début de XVII siècle, in "Dal basso fuoco all'alto forno - atti del I simposio Valle Camonica 1988 'La Siderurgia nell'Antichità", p. 265-274.
- BELHOSTE J.F., 1991 (B), L'Italie du Nord et le procédé indirect: un hainon manquant (remarques de conclusion), in "Dal basso fuoco all'alto forno - atti del I simposio Valle Camonica 1988 'La Siderurgia nell'Antichità", p. 327-336.
- BELHOSTE,J.F., 2000, Martinet et fusina dans la sidérurgie alpine aux XIIIe et XIVe siècles, in "Il ferro nelle Alpi. Giacimenti, miniere e metallurgia dall'antichità al XVI secolo. Atti del Convegno", p. 146-151y.
- BENOIT P., GRANDEMAGNE J., 1986, La mine de Pampailly : archives et archéologie, in "Les ressources minérales et l'histoire de leur exploitation, Actes du 108e CNSS", pp. 175-180.
- BENOIT P., 1988, Les techniques minières en France et dans l'Empire aux XV et XVI siècle, in "Journal des Savants 1988 1-2", pp. 75-118.

- BENOIT P., CAILLEAUX D., 1988, *Homme et travail du métal dans les villes medievals*, Paris.
- BENNERAG C., GRANDIN L., HJARTHER-HOLDAR E., STILBORG O., 2021, Hunter-gatherer metallurgy in the Early Iron Age of Northern Fennoscandia & Kristina Söderholm, in "*Antiquity 2021vol 95*", p. 1511–1526.
- BERTOLOTTI A., 1871, *Gli statuti minerari della valle di Brosso*, Torino.
- BERTON R., 1989, La mémoire du sol, in "*Revue Geographique de l'Est*", p. 297-298.
- BERTRAND P., 1987, La forge et la fabrique royale d'armes de Nouzon, in "*La Métallurgie de fer dans les Ardennes (XVIe - XIXe)*", p. 89-102.
- BIANCO DE SAVANT N., 1964, Le fucine di Lanzo. Studio economico storico sulle utensilerie meccaniche esistenti in Lanzo Torinese 1865 - 1965, Lanzo Torinese.
- BINACHI R., 1946, *La metallurgia ai tempi dell'Impero Romano*, Roma.
- BIRINGUCCIO V., 1540, *De la Pirotechnia*, (ristampa anastatica a cura di Adriano Carugo - Milano, 1977), Venezia.
- BJÖRKENSTAM N., FORNANDER S., 1985, Metallurgy and technology at Lapphyttan, in "*Medieval Iron in society*", p. 184-225.
- BAYLEY J., CROSSLEY D., POINTING M., 2008, *Metals and Metalworking. A research framework for archaeometallurgy*, London.
- BLASQUEZ MARTINEZ J. M., 1989, Administracion de las minas en epoca romana. Su evolucion, in "*Mineria y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterraneas y europeas*", p. 119-131.
- BLOK M., 1977, *La società feudale*, Torino.
- BHONE C., 1967, Les philistins et le fer, in "*Revue d'Histoire de la sidérurgie*" VIII-4, p.237-244.
- BOSCH P.W., 1979, Una miniera di selce del Neolitico, in "*Le Scienze n. 133*", p. 100-108.
- BOUCHAYER ., 1927, *Les chartreux maitres deforges*, Grenoble.
- BOULIN M., 1960, Les origines du mulin à fer; in "*Revue d'Histoire de la sidérurgie, 1-3*", p. 7-41.
- BOULIN M., 1960, Enquete sur les martinets réalisés par le laboratoire d'éthnographie française du Musée des Arts et traditions populaires, in "*Revue d'Histoire de la sidérurgie 1-3*", p. 43-56.
- BOUTRUCHE R., 1978, Signoria e feudalesimo ordinamento curtense e clientele vassallatiche, Bologna.
- BRANDSLET S., 2017, The enigma of early Norwegian iron production, in "*Trøndelag County Authority*", <https://norwegianscitech-news.com/2017/09/the-enigma-of-norwegian-iron-production/>
- BRAUDEL F., 1977, *Capitalismo e civiltà materiale*, Torino.
- BRAUNSTEIN P., 1986, Mines et metallurgie dans la France Ancienne, in "*Dossiere Histoire et Archeologie, n. 107*", p. 223-229.
- BREGLIA F., CARICOLA I., LAROCCA F., 2016, Macrolithic tools for mining and primary processing of metal ores from the site of Grotta della Monaca (Calabria, Italy), in "*Journal of Lithic Studies (2016) vol. 3, nr. 3*", p. 57-76.
- BROCCHI G. B., 1802, *Memorie sulle miniere del dipartimento del Metta*, ms, Archivio di Stato di Milano.
- BROCCHI G. B., 1808, *Trattato mineralogico e chimico sulle miniere di ferro del dipartimento del Mella con l'espressione della costituzione fisica delle montagne metallifere della Val Trompia*, Brescia.
- BROMEHEAD C. N., 1961, Coltivazione delle miniere e delle cave, in "*Storia della tecnologia vol. I*", p. 567-594.
- BROMEHEAD C. N., 1962, La tecnica delle miniere e delle cave fino al XVII secolo, in "*Storia della tecnologia vol. II*", p. 1-40.
- BUFFON de LECLERC G.L., 1770-83, *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roi* (teoria della terra e d'introduzione alla storia de' minerali), voll. 25-30, Milano.
- BUSANA M.S., BERNARDI L., 2018, Il ciclo produttivo del ferro: nuove chiavi di lettura degli indicatori archeologici, in "*MVLTA PER ÆQVORA' Il polisemico signicato della moderna ricerca archeologica. Omaggio a Sara Santoro*", p. 399-432.
- BUISSON J.F., 1982, *Archeologie Gallo-Romaine*, Metz.
- BULFERETTI L., 1980, La siderurgia piemontese e valdostana nel XVIII secolo, in "*Ricerche Storiche X - 3*", p. 519-555.
- CABBOI, S., DUNIKOWSKI C., LEROY M., MERLUZZO P., 2004, Les systèmes de production sidérurgique chez les Celtes du Nord de la France, in "*L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation*", p. 35-62.

- CALEGARI M., BARTOLOMEI M.T., 1977, Il basso fuoco alla genovese; insediamento, tecnica, fortuna (sec. XIII - XVIII), in "Quaderni del Centro di Studio sulla Storia della tecnica n. 1", p. 1-53.
- CALMOTTI F., 1989, La fusione del ferro nei dipinti fiamminghi del XVI, in "Il Coltello di Delfo, 9", p. 23-29.
- CAILLEAUX D., 1984, L'industrie du fer en Sénonais en forêt d'Othe à la fin du Moyen Age, in "Etudes Bourguignonnes - 109ème congrès national des Sociétés Savantes", p. 147-163.
- CAMPORALE G., MOROLLI G., (a cura), 1990, Gli Etruschi - mille anni di civiltà, Firenze.
- CASSANELLI R., 1985, Storia dei Longobardi, Milano.
- CAUVET B., 1987, La Ruina Montium: un type d'exploitation minière romaine en alluvion aurifères, caractéristiques de Bierzo (Leon Espagne), in "Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines", 87-97.
- CECH B., 2012, The production of ferrum Noricum. Largescale Roman iron production in Hüttenberg (Austria), in "Notizie Archeologiche Bergomensi 20", p.79-94.
- CHARVET L., 1967, Le rôle des Exploitations certusiennes dans l'essor de la métallurgie alpine, in "Revue d'Histoire de la sidérurgie 3", p. 49-69.
- CHIRIKURE S., 2015, Metal in past societies. A global perspective of indigenous african metallurgy, Cape Town.
- CIMA M., 1981, Archeologia e storia dell'industria di una valle, Firenze.
- CIMA M., PASINATO D., 1984, Altoforni canavesani tra Sette e Ottocento, in "Archeologia Industriale n. 5", p. 7-34.
- CIMA M., 1984, Metallurgia del ferro nelle Alpi Canavesane, in "Archeologia Medievale XI", Firenze.
- CIMA M., 1985, Mastri ferrai in terra canavesana - il caso della comunità di Brosso nelle Alpi canavesane, Firenze.
- CIMA M., 1986, Metallurgia in ambiente rurale al sito alto-medievale di Misobolo, in "Archeologia Medievale XIII", Firenze.
- CIMA M., 1986, L'industrie dans le Canavois (Piemont) au milieu du XVIII siècle, in "Le Monde Alpin et Rhodanien 3-4", p. 41-65.
- CIMA M., 1986, Metallurgia in ambiente rurale al sito alto medievale di Misobolo, in "Archeologia Medievale XIII", p. 173-189.
- CIMA M., 1987 (A), Le origini della metallurgia del ferro in Canavese, in "Rivista di Archeologia, XI", p. 113-119.
- CIMA M., 1987 (B), Strategie tecnologiche per l'industria alpina del ferro nei tre secoli dell'Età Moderna, in "Ricerche Storiche XVI - 2", p. 207-241.
- CIMA M., 1988, Le risorse della metallurgia, in "Per pagos vicosque - Torino Romana fra Orco e Stura", p. 211-212.
- CIMA M., 1989, Tecnologie e produzioni siderurgiche protoindustriali nel Settecento piemontese, in "Rivista dell'Associazione Mineraria Subalpina, XXVI - 1", p. 33-52.
- CIMA M., 1991, Il cannechcio bresciano tra forno a manica e altoforno, in "Dal basso fuoco all'alto forno - atti del I simposio Valle Canonica 1988 'La Siderurgia nell'Antichità'". p. 275-294.
- Cima M., 2008, Ceresole Reale - Storia di un paese, Torino.
- CIMA M., PANTO' G., 2019, Longobardi a Belmonte, Torino.
- CIMA M., 2023, Preistoria e protostoria del Canavese, Torino.215-246.
- CLARK J.G.D., 1955, L'Europe Préhistorique lesfondaments de son économie, Paris.
- CLEERE H., 1984, Ironmaking in the economy of the ancient world: the potential of archaeometallurgy, in "The craft of the blacksmith", p. 224-228.
- CLEERE H., CROSSLEY D., 1985, The iron industry of the Weald, Leicester.
- CONOPHAGOS C., PAPANIMITI G., 1986, La métallurgie du fer et de l'acier en Grèce pendant la période classique, Roma.
- CONVERESI R., 2019, Piana di San Martino - un laboratorio di fabbro d'età longobarda, in "Longobardi a Belmonte", p. 163-170.
- COUDROT J.L. e DECKER E., 1986, La Lorraine d'avant l'histoire, Metz.
- CREW P., 1984, Bryn y Castell Hillfort - a late prehistoric iron working settlement in north-west Wales, in "The craft of the blacksmith", p. 91-100.

- CUCINI TIZZONI C., TIZZONI M., 2004, Alle origini dell'altoforno: i siti della Val Gabbia e della Val Grigna a Bienno in Valcamonica, in *"Musei del Ferro in Europa e in Italia"*, p. 25-42.
- CUOMO DI CAPRIO N., STORTI A., 1984, Tradition of the wather wheel in Italy, in *"The craft of the blacksmith"*, p. 97-106.
- CUPPERS H., KOLLING A., THILL G., 1983, Les Trevires - La civilisation romane de la Moselle à la Sarre, Paris.
- CURIONI G., Sull'industria del ferro in Lombardia, Milano.
- CUSCITO G., 1981, Aquileia storia musei basiliche scavi, Bologna.
- DA LEZZE G., 1973, Catastico Bresciano, Voli. I, II,III, Ristampa Anastatica, Brescia.
- DAUMAS M., 1980, L'archéologie industrielle en France, Paris.
- DA VICO R., 1977, Mines et usines en Piémont au début du XIX siècle, in *"Annales Historiques de la Rivolution Francaise XXXIX"*, p. 618-634.
- DE BARROS Ph., 2021, La Métallurgie du Fer en Pays Bassar (Nord-Togo) Depuis 2400 Ans. Tome I: L'Âge du Fer Ancien (de 400 avant J.-C. à 130 après J.-C.), Paris.
- DE GENSANNE M., 1776, Traité de la fonte des mines par le feu du charbon de terre, Paris.
- DE SAINT ANGE W., 1835-1838, Métallurgie Pratique du Fer, Paris.
- DE SANTIS A., COSENTINO S., MIELI G., 2019, L'area artigianale dell'età del Ferro del Foro di Cesare – Roma, in *"Incontri annuali di Preistoria e Protostoria 6"*, p. 140-142.
- DECHELETTE J., 1914, Manuel d'Archéologie, tomo II, Celtique et gallo-romaine, Paris.
- DELLA FRATTA MONTALBANO M. A., 1678, Pratica Minerale, Bologna.
- DEMIANS-D'ARCHIMBAUD, G. 1981 - 83, Aujourd'hui le Moyen Age Archéologie et vie quotidienne en France méridionale, 1983, Senanque.
- DIDEROT e D'ALEMBERT, 1751-177, 2 L'Encyclopédie Forges ou art du fer, 2e section, Paris.
- DISSER A., DUBOIS C., 2021, Mines et métallurgie du fer pour les périodes historiques dans le département de l'Ariège, in *"HAL Open Science"*, p. 9-83.
- DOMERGUE C. JARRIER C., TOLLON F., 1982, Les fours de réduction du fer dans la Montagne Noire é l'époque Gallo-Romaine et leur production, in *"Mines et fonderie antiques de la Gaule"*, p. 147-156.
- DOMERGUE C., 2008, Les mines antiques. La production des métaux aux époques grecque et romaine, Paris.
- DUREAULT H., 1961, Les mines de fer au Moyen Age, in *"Revue d'Histoire de la sidérurgie II - 3"*, p. 161-170.
- DUVAL M., 1975, Les forges d'Olivet et les vicissitudes du patrimoine forestier de la famille Laval (1619-1660), in *"Carrières, Mines et métallurgie de 1610 à nos jours, Acts du 98ème Congrès national des Sociétés Savantes"*, p. 55-64.
- ELIYAHU-BEHARA A., YAHALOM-MACKA N., SHILSTEINA S., ZUKERMANC A., SHAFER-ELLIOTTD C., M. MAEIRE A., BOARETTOF E., FINKELSTEINA I., WEINERB S, 2012, Iron and bronze production in Iron Age IIA Philistia: new evidence from Tell es-Safi/Gath, Israel, in *"Journal of Archaeological Science 39"*, p. 255-267.
- ERRARD J., 1584, Les trois livres des instruments mathématiques et mécaniques, Nancy.
- ESHEL T., TIROSH O., BORNSTEIN Y., BAR S., 2023, The Metal Assemblage of Early Iron Age el-Ahwat: Trade and Metalworking in the Margins of the Southern Levantine Central Highlands, in *"Journal of the Institute of Archaeology of Tel Aviv University"*, p. 44-74.
- EVRARD R., 1960, Essai de terminologie pour les anciens appareils producteurs de métaux ferreux et pour leur produits, in *"Revue d'Histoire de la Sidérurgie, 1-2"*, p. 53-59.
- FAINA G., 1966, Note sui bassi fuochi liguri nel XVU e XVIII secolo, in *"Miscellanea di storia ligure, IV"*, 198-221.
- FEDELI F., 1983, Populonia storia e territorio, Firenze.
- FLUCK P., 1982, L'art et les Mines dans les Vosges, in *"Pierre et Terre, 25 - 26"*, p. 67-83.
- FLUCK P., BARI H., 1982, Pierre et terre - l'art et les mines dans les Vosges, Strasbourg, in *"Pierre et terre, 25 - 26"*, p. 8-18.
- FLUCK P., BARI H., 1988, Eléments pour une carte souterraine de Granfontaine, in *"Pierre et Terre 31 - 32"*, p. 53-67.

- FORBES R. J., 1962, Metallurgia, in "Storia della Tecnologia vol I", p. 41-82.
- FORBES R. J., 1972, Studies in ancient technology, vol. VIII, Leiden.
- FORBES R. 1981, Estrazione, fusione e leghe, in "Storia della Tecnologia voi I", p. 581-609.
- FORTI U., 1974, Storia della Tecnica, vol. II, - Dalla rinascita dopo il Mille alla fine del Rinascimento, Torino.
- FOSSIER R., 1961, L'activité métallurgique d'une abbaye cistercienne: Clairvaux, in "Revue d'Histoire de la Siderurgie II - 1y", p. 7-14.
- FOSSIER R., 1985-1987, Storia del Medioevo, Voll. I, II, III, Torino.
- FRANCE-LANORD A., 1949, La fabrication des épées damassées aux époques mérovingienne et carolingienne, in "Le Pays gaumois, 10e année", p. 1-27.
- FRANCE-LANORD A., 1956, Evolution de la technique du fer en Europe Occidentale de la Préhistoire au Haut Moyen-Age, in "Actes du colloque International - Le fer à travers les ages", p. 27-43.
- FRANCE-LANORD A., 1960, La fabrication des fourreaux d'épées en fer à l'époque de La Tène, in "Revue d'Histoire de la Siderurgie I - 1", p. 7-12.
- FRANCE-LANORD A., 1963, Les lingots de fer protohistoriques, in "Revue d'Histoire de la Siderurgie IV", p. 167-178.
- FRANCE-LANORD A., 1964, La fabrication des épées de fer gauloises, in "Revue d'Histoire de la Siderurgie V - 1", p. 315-327.
- FRANCE-LANORD A., 1969, Le fer en Iran au premier millénaire avant Jésus-Crist, in "Revue d'Histoire de mines et de la Métallurgie, 1-1", p. 75-126.
- FRANCE LANORD A., 1983, La notion d'aciers au cours des âges, in "Journées de Paléometallurgie", p. 15-35.
- FRANCIS P., 1989, Les recherches en archéologie minière dans le sud des Vosges lorraines, in "Le pays lorrain", p. 109-124.
- FRANCOVICH R., 1994, Le ragioni di un parco alle radici dell'archeologia mineraria le miniere di Campiglia Marittima nelle pagine dei naturalisti e dei geologi dell'Ottocento, Venezia.
- FRANCOVICH R., 1992, L'Archeologia mineraria e il caso di Rocca San Silvestro, un villaggio di minatori e fonditori di metalli, in "L'Appennino settentrionale. 76° Riunione estiva della Società Geologica Italiana (Firenze, 24-26 settembre 1992)", p. 254-256.
- FRANCOVICH R. et al., 1986, Un villaggio di minatori e fonditori di metallo nella Toscana del Medioevo: San Silvestro (Campiglia Marittima), in "Archeologia Medievale XII", p. 313-402.
- FRANCOVICH R., PARENTI R., (a cura), 1987, Rocca San Silvestro e Campiglia. Prime indagini archeologiche, Firenze, All'Insegna del Giglio (Quaderni dell'Insegnamento di Archeologia Medievale della Facoltà di Lettere e Filosofia dell'Università di Siena, 8), Firenze.
- FRANCOVICH R., 1987, IRocca San Silvestro e Campiglia - prime indagini archeologiche, Firenze.
- FRANCOVICH R., 1988, Il passato in miniera, in "Archeologia Viva, VII - 2", Firenze, p. 34-43.
- FRANCOVICH R. (a cura), 1993, Archeologia delle attività estrattive e metallurgiche, Firenze.
- FOSSIER R., 1983, Lomoyen age en Picardie, Amiens.
- FROLA G., 1918, Corpus Statutorum Canavisii, Voli. I, II, III, Torino.
- FRUMENTO A., 1963, Imprese lombarde nella storia della siderurgia lombarda, vol. I, II, III, Milano.
- FRUMENTO A., 1972, La metallurgia bresciana nel 1802 in un manoscritto di G. B. Brocchi e nel rapporto per una scuola nazionale di metallurgia, in "Commentari dell'Ateneo di Brescia per l'anno 1971 A.A. CLXX", p. 191-230.
- FUMAGALLI V., 1980, Strutture materiali e funzioni dell'azienda curtense. Italia del Nord: sec. VIII - XII, in "Archeologia Medievale VII", P. 21-29.
- GAIO PLINIO S 1988, Storia Naturale voi. V, Torino.
- GALLEANI NAPIONE C. A., 1785, Description minéralogique des montagnes du Canavois, in "Memorie dell'Accademia della Scienze di Torino", p. 341-374.
- GALLIOU P., 1982, Mines et métaux de l'ouest de la Gaule, in "Mines et fonderies antiques de la Gaule", p. 21-32.
- GARBAGLIA G. PANELLA A., 1938, Ordinamenta super ramariae et argenteriae civitatis Massae - The mining state of Massa

Marittima (Grosseto, Italia), an early 14th century act of the miners corporation,, Firenze.

GARILLOT J., 1967, Le grillage des minerais de fer, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie VIII- 2'*", p. 95-96.

GAVAGNIN S., 2019, Ripostiglio longobardo di Casteirolo - Un singolare ritrovamento nell'entroterra ligure, in "Longobardi a Belmonte", p. 157-162.

GARROUSTE P., 1984, Filières techniques et économie industrielles - l'exemple de la forge, Lyon.

GHIGLIONE G., 2016, Le ferrière genovesi in età preindustriale: aspetti tecnici, innovazioni e declino, Working Paper IRCrES, N° 01/2016, Genova.

GIARDINO C., 2003, Metallurgy in Italy between Late Bronze Age and Early Iron Age, in "*Papers in Italian Archaeology VI – vol I'*", p. 491-501.

GILLE B., 1960, L'industrie métallurgique champenoise au Moyen Age, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie, 1-1'*", p. 13-20.

GILLE B., 1962, Cartulaire de la sidérurgie française, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie, III-4'*", p. 27-34.

GILLE B., 1968, L'organisation de la production du fer au Moyen Age, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie, IX - 2'*", p. 95-121.

GILLE B., 1969, Les problèmes de la technique minière au Moyen-Age, in "*Revue d'Histoire des Mines et de la Métallurgie, 1-2'*", p. 279-297.

GILLE B., 1970, L'évolution de la technique sidérurgique esquisse d'un schéma, in "*Revue d'Histoire des Mines et de la Métallurgie II - 2'*", p. 121-226.

GILLE B., 1972, Leonardo e gli ingegneri del Rinascimento, Milano.

GILLE B., s.d., Les origines de la grande industrie métallurgique en France, Paris.

GIOT P.R., BRIARD J., PAPE L., 1979, Protobistoire de la Bretagne, Rennes.

GIRARDOT A., 1970, Forges princières et forges monastiques, coup d'oeil sur la sidérurgie lorraine aux XII et XIII siècle, in "*Revue d'Histoire des Mines et de la Métallurgie, II - 1'*", p. 13-20.

GOMORI J., 1984, Some Relicts of the early Hungarian blacksmith's craft, in "*The craft of the blacksmith*", p. 131-147.

GORDON CHILDE V., 1961, Moro rotatorio, in "*Storia della Tecnologia vol. I'*", 188-216.

GRANDEMANGE J., 1992, L'aérage dans les mines polymétalliques du massif vosgien au XVIIe s., in "*Les techniques minières de l'Antiquité au XVIIIe s., Actes du 113e CNSS, Strasbourg 1988*", p. 407-420.

GRANDEMANGE J., 1994, Le lavage des minerais argentifères au Samson (Sainte-Croix-aux-Mines, HautRhin), in "*Mines et métallurgie, PPSH, Les chemins de la Recherche n° 21*", p. 77-96.

GRANT M., 1982, Le città e i metalli - società e cultura degli Etruschi, Firenze.

GREBENART D., 1988, Lespremiers métallurgistes en Afrique occidentale, Paris.

GUILLOME CH., 1986, Le silex en Lorraine, in "*La Lorraine d'avant l'histoire*", p. 219-265.

GUILLOT I., FLUZIN Ph, 1987, Interprétation structurale de l'élaboration et de l'utilisation d'outils miniers, in "*Bulletin de la Société préhistorique française*", p. 248-256.

HAALAND R., 2004, Iron smelting a vanishing tradition: ethnographic study of this craft in south-west Ethiopia, in "*Journal of African Archaeology Vol. 2 (1)2'*", p. 1-15

HALLAM E. M., 1986, Domesday book, through nine centuries, London.

HALLEUX R., 1974, Le problème des métaux dans la Science Antique, Liège.

HASSENFRATZ J. H., 1812, La sidérothechnie, ou l'ati de traiter les minerais de fer polir en obtenir de la fonte, de fer, ou de l'acier, 4 voll., Parigi.

HECKENAST G., 1966, La sidérurgie hongroise occidentale de X au XIII siècle, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie VII-2'*", p. 135-161.

HECKENAST G., 1968, La fabrication du fer dans le Burgenland et en Hongrie occidentale de X au XIII siècle, in "*Revue d'Histoire de la Sidérurgie IX - 3'*", p. 54 - 61.

HINGST H., 1981, Die Eisenverhüttungsplätze im Ablauf der vor- und frühgeschichtlichen Besiedlung in Schleswig-Holstein, in "*Frühes Eisen in Europa - Acta 3'*", p. 79-88.

- JARS M., 1774, Voyages métallurgiques ou recherches et observations, I, II, III, Lyon.
- JERNKONTORET F., 1985, Medieval iron in society, Stockholm.
- JOVANOVIĆ B., 1980, Le origini dell'estrazione del rame in Europa, in "Le Scienze n. 143", p. 94-100.
- KEESMANN. et al., 1989, Un centro primitivo de la elaboración de hierro en la factoria fenicia de Toscanos, in "Mineria y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterraneas y europeas, vol. I". P. 73-90.
- KRAMER K., 1983, Beitrage zur ekonomie und sozialstruktur desalthallstatischen salzbergbaus zu Halstatt, in "Le peuplement de l'interieur du massif alpin de la prehistoire a la fin de l'antiquité", 118-164.
- KRAEMER H., s.d., L'uomo e i minerali, Milano.
- KREPS M., 1968, La sidérurgie des pays tchèques dans la seconde moitié du XVI^esiècle, in "Revue d'Histoire de la Sidérurgie IX - 1^{er}", p. 181-192.
- KRULIS RANDA L., 1967, Le développement des fourneaux à fer et l'introduction du haut fourneau wallon et bohème, in "Revue d'Histoire des mines et de la métallurgie VIII - 4^e", p. 228-303.
- KUCUKARSLAN N., 2012, Early Efforts for Iron Production in Central Anatolia: Geochemical Analysis of Iron-rich Stones, Slags and Metal Objects from the Bronze Age in Kaman-Kalehöyük (Turkey) (*Tesi di laurea*).
- KUCUKARSLAN N., OTA T., KOBAYASHI K., NAKAMURA E., OMURA S., 2023, Early Efforts to Smelt Iron in Central Anatolia: Analysis of Iron Artefacts from the Bronze Age in Kaman-Kalehöyük, in "Metallography, Microstructure, and Analysis, vol. 12", p. 289 - 305.
- LA SALVIA V., 2018, Migrazioni di saperi tecnici nel campo della metallurgia e delle arti del fuoco, in "Settimane di studio della fondazione Centro Italiano di Studi sull'Alto Medioevo LXVI", p.755-803.
- LAPASSAT R., s.d., L'industrie du fer dans les Pyrénées orientales et ariégeoises au XIX^e siècle - les forges catalanes, Perpignan.
- LE GOFF J., (1977), Tempo della chiesa e tempo del mercante, Torino.
- LE GOFF J., (1981), La civiltà dell'Occidente medievale, Torino.
- LENFANT E., 1909, La découverte des grandes sources du centre de l'Afrique - rivières de vie, rivières de mort - Nana - Ouam, Paris.
- LEON P., 1960, les essais de rénovation de la métallurgie dauphinoise a la fin du XVIII^eème siècle, in "Revue d'histoire de la sidérurgie I - 1^{er}", p. 456-457.
- LEROI-GOURHAN A., 1960, Notes sur une histoire des aciers, in "Techniques et Civilisations II", p. 4-11.
- LEVI M. A., 1969, Il mondo antico e la Grecia Arcaica, in "Storia Universale dei Popoli e delle Civiltà, vol. II", p. 1-542.
- LIVINGSTONE D. & C., 1881, Exploitation du Zambèse et de ses affluents et découverte des lacs Chirona et Nyassa, Paris.
- LOMBARD M., 1974, Les métaux dans l'ancien monde du V^e au XI^esiècle, Paris.
- MACQUEEN J. G., 1975, The Hittites and their contemporaries in Asia Minor, London.
- MADDIN R.Muhly J.D., Weelher- T.S., 1978, Come ebbe inizio l'Età del Ferro, in "Le Scienze 113" p. 110-117.
- MADDIN R., 1985, The technology of ironmaking, in "Medieval Iron in society", p. 128-157.
- MAGAR F., 2021, La métallurgie du fer médiévale dans le massif vosgien, in "Revue d'Alsace", p. 53-78.
- MAGNUSSON G., 1984, Who were the blacksmiths in jamtland and Harjedalew, in "The craft of the blacksmith", p. 447-450.
- MAGNUSSON G., 1991, Ore as a factor for the development of the indirect process, in "Dal basso fuoco all'alto forno - atti del I simposio Valle Canonica 1988 'La Siderurgia nell'Antichità", p 83-103.
- MALINVERNO B., DOYEN J.P., 1988, Image du patrimoine - l'ancienne metallurgie dans le département des Vosges, Nancy.
- MANGIN M., 1981, Un quartier commercants et d'artisans d'Alesia - Contribution à l'histoire de l'habitat urbain en Gaule, Dijon.
- MANGIN M., 1982, Caractères et fonctions de la métallurgie du fer à Alesia, in "Mines et fonderies antiques de la Gaule", p. 237-258.
- MANGIN M, FLUZIN P., 2007, L'organisation de la production métallurgique dans une ville gallo-romaine: Le travail du fer à Alesia, in "Revue Archéologique de l'Est, t. 55-2006", p. 129-150.

- MARECHAL J. R., 1983, *La Préhistoire de la Metallurgie et ses prolongements*, Avignon.
- MARCHESI G., MURA L., 2006, Il forno fusorio di Livemmo, in *"Archeologia Medievale XXXIII"*, p. 517-524.
- MARCHIS V., 1985, Le origini del tornio, in *"Un testimone dello sviluppo industriale - il tornio"*, p. 5-40.
- MARCHIS V., 1988, Ruote, mulini e macchine, in *"Acque, ruote e mulini a Torino vol. I"*, p. 11-77.
- MAZZOLENI D., 1987, Vita quotidiana degli antichi cristiani nelle testimonianze delle iscrizioni, in *"Dossier ARCHEO"*, Novara.
- MÉLO A., 2021, Les Déserts – Bas-fourneau du Nivolet, in *"ADLFI. Archéologie de la France - Informations"*, <http://C:/Users/Utente/Downloads/adlfi-127173.pdf>
- MENIS G.C., 1990, I Longobardi, Milano.
- MERCANTI M., 1717, *Metallotheca Vaticana*, Roma.
- MONDINI A., 1973, Dalla preistoria all'anno Mille, in *"Storia della tecnica vol. I"*, p. 91-409.
- MONDINI A., 1977, Storia della Tecnica, Dal Seicento al Novecento, Storia della tecnica vol. III, Torino.
- MORELLI R., 1980, Sullo 'stato d'infanzia' della siderurgia toscana: le ferriere di Follonica e Cornia (1640 -1680), in *"Ricerche Storiche, X - 3"*, p. 479-517.
- MOREAUX M. P., 1964, La siderurgie belge et luxembourgeoise d'Ancien Régim, in *"Revue d'histoire de la siderurgie, I - 1"*, p. 101-139.
- MOSCATI S. et al., 1991. I Celti, Venezia.
- ROZEK S., 1989, Le travail des hommes libres dans les mines romaines, in *"Mineria y Metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterraneas y europeas"*, p. 171-181,
- MUTHUON J., 1808, *Traité des forges dites catalanes ou l'art d'extraire directement et par un seule opération le fer de ces mines: contenant le detail des construction et dispositions métallurgiques qui s'y rapportent, et la manière de reduire la gueuse en fer au moyen de la fusion liquide dans les affineries et de nouvelles expériences sur les pompes*, Torino.
- NAKAI I., ABE Y., TANTRAKARN K., OMURA S., ERKUT S., 2012, Preliminary Report on the Analysis of an Early Bronze Age Iron Dagger Excavated from Alacahöyük, in *"Anatolian Archaeological Studies"*, p. 321-323.
- NEF J. U., 1982, Le miniere e la metallurgia nella civiltà materiale, in *"Storia economica Cambridge, 2. Commercio e Industria nel Medioevo"*, p. 482-550.
- NOLWENN Z., 2021, La métallurgie du fer en Normandie et ses marges de l'âge du Fer au Moyen Âge, *Tesi di dottorato presso Université Bourgogne Franche Compté*, Besançon.
- NURIA R., ANDREAZINI A., DELGADO RAAK S., HUNT M.A., 2028, Una explotación de cobre prehistórica: la mina de la Turquesa, Cornudella de Montsant, Tarragona, in *"Paragénesis. Revista de Mineralogía, vol 1, núm. 6"*, p. 7-36.
- NEGRONI CATACCHIO N. et al., 1979, Il Bronzo Finale nell'Italia Nord-Occidentale, in *"Atti della XXI riunione scientifica - Il Bronzo Finale in Italia"*, 47-116.
- NICCO R., 1987, L'industrializzazione in valle d'Aosta - studi e documenti, voll. I, Aosta.
- NICCO R., 1987, L'industrializzazione in valle d'Aosta - studi e documenti, voll. II, Aosta.
- NICCO R., 1989, L'industrializzazione in valle d'Aosta - studi e documenti, voll. III, Aosta.
- OEHL S., 2011, Bildliche Darstellungen vom Schmied Wieland und ein unerwarteter Auftritt in Walhall, in *"Goldsmith Mysteries Archaeological, pictorial and documentary evidence from the 1st millennium AD in northern Europe In memoriam Maiken Fech"*, p. 279-332.
- OGE' F., 1988, La metallurgie du fer dans les Ardennes (XVI-XIX) Chalon sur Marne.
- PAPULI G., 1991, I chiodi romani di Inchtutbil, in *"Il Coltello di Delfo n. 17"*, p. 52-53.
- PAULI W., 1983, Le Alpi: archeologia e cultura del territorio - dall'Antichità al Medioevo, Bologna.
- PELATAN J., 1985, Une industrie méconnue : la métallurgie dans le Perche aux XVIIIe et XIXe siècles, in *"Annales de Normandie. L'Orme industrielle XVIIIe-XXe siècles"*, p. 325-347.
- PELET L., 1960, Recherches sur la metallurgie du fer dans lejura Vaudois, in *"Mines et fonderie antiques de la Gaule"*, p. 205-214.

- PELET P. L., 1971, Un complexe usinier à l'époque de la guerre de Trente Ans-, Bon Port en 1623, in "*Revue d'Histoire des Mines et de la Metallurgie*", Tomo III - 1, Jarville.
- PELET. L., 1973, Fer, charbon acier dans lespays de Vaud - Une industrie reconnue, vol. I, Lausanne.
- PELET. L., 1978, Fer, charbon acier dans lespays de Vaud - La lente victoire du haut fourneau, vol. II, Lausanne.
- PELET. L., 1983, Fer, charbon acier dans lespays de Vaud - du mineur à l'horloger, vol. III, Lausanne.
- PENE VIDARI G. S., 1989, Disciplina mineraria e territorio, in "*Bollettino dell'Associazione Mineraria Subalpina, XXVI-I*", 23-32.
- PERUCCA E., 1968-79, Dizionario di Ingegneria, voi. I - XI, Torino.
- PERRET S., 2013, La métallurgie du fer ancienne des Convers et de la Bérudaz, Mont Salève (Cruseilles/Présilly, Haute-Savoie), in "*Technical Report - Département de Géosciences Université de Fribourg Suisse*", p. 5-68.
- PINI E., 1785, De Venarum Metallicarum Escotone, Milano.
- PLAINER R., 1963, La siderurgie dans les pays tchèque au Moyen Age, in "*Revue d'Histoire de la sidérurgie III - 2*", p. 169-256.
- PLAINER R., 1969, Iron working in ancient Greece, in "*Acta Musei Nationalis Technici Pragae*", p. 7-74.
- PORTOGHESI P., 1981, Infanzia delle macchine, Roma - Bari.
- PREDALI R., 1980, Miniere, forni e fucine - l'industria del ferro nelle valli bresciane, in "*Atlante valsabbino*", p. 132-147.
- PUTELLI R., 2016, Vita storia ed arte bresciana nei secoli XIII e XVIII, vol. IV industrie, Breno.
- RADWAN M., 1966, L'ancienne technique sidérurgique polonaise, in "*Revue d'histoire de la sidérurgie, VII-2*", p. 163-188.
- RAMELLI A., 1588, Le diverse et artificiose macchine, Bologna.
- RAMIN J., 1977, La technique minière et métallurgique des Anciens, Bruxelles.
- REYNOLDS T., 1985, Iron and water: technological context and the origins of the water- powered iron mill, in "*Medieval iron in society*", p. 61-80.
- ROTHEMBERG B., 1972, Timna - valley of the biblical copper mines, Aylesbury.
- ROTHEMBERG B., FREIJERIO A.B., 1981, Ancient mining andmetallurgy insouth-westSpain, London.
- SABLAYROLLES R., 1982, Intéretet problemes de l'étude des férrières antiques: l'exemple de la Montagne Noire, in "*Mines et fonderie antiques de la Gaule*", p 183-190.
- SAINT ANGE W. de, 1835-38, Métallurgie Pratique dufer, voll. I, II testo e voll. I, II tavole, Paris.
- SALIN E., 1955, Les techniques après les grandes invasions, in "*Actes du colloque international - le fer à travers les âges*", p. 45-56.
- SALIN E., 1957, La civilisation merovingienne. Voll. I, II e III, Paris.
- SASISEKARAN B, RAGHUNATHA RAO B, 2001, Iron in ancient Tamilnadu, in "*Metallurgy in India: A retrospective*", p. 92-103.
- SCAFILE F., 1971, Di alcuni oggetti in ferro rinvenuti a Belmonte, in "*Ad Quintum n. 3*", p. 28-32.
- SCHNEIDER J., 1955, Fer et siderurgie dans l'economie européenne du XI au XVII siècles, in "*Actes du colloque international - Le fer à travers les âges*", p. 71-77.
- SCHUBERT H. R., 1976, Estrazione e produzione dei metalli: ferro e acciaio, in "*Storia della Tecnologia vol. IV*", p. 100-119.
- SCHLUTTER C. A., 1750, De la fonte des mines des fonderies, etc Traduit de l'Allemand des Christophe-André Schlutter, voll. I e II, Paris.
- SCOTT B. G., 1984, The status of the blacksmith in the early Ireland, in "*The craft of the blacksmith*", p. 153-156.
- SETTIAA. A., 1984, Castelli e villaggi nell'Italia padana, Napoli.
- SIMONELLI R., 1973, La Valcamonica una valle siderurgica alpina, Roma.
- SMIDT R., 1941, Kleines Stadtbuck von Königshütte Oberschleisen, Berlino.
- SMITH, G. 2018 Hillforts and Hut Groups of North-West Wales, in "*Internet Archaeology 48*", <https://doi.org/10.11141/ia.48.6>.

- STIPIEVIC' A., 1966, Gli Illiri, Milano.
- SWEDEMBORG E., 1734, Regnum subterraneum sive minerale de cupro et orichalco deque modis liqationum cupriper Europam passim in usum receptis, Dresde e Liepzing.
- SCHWEINFURTH G., 1875, Au coeur de l'Afrique 1868- 1871 voyage et découvertes dans les régions inexplorées de l'Afrique Centrale, Paris.
- TANGHERONI M., 1985, La città dell'argento-Iglesias dalle origini alla fine del Medioevo, Napoli.
- THEOPHILUS, 1961, De diversis artibus, translated from the latin with introduction and notes by C.R. Dodwell, New York.
- TOGNARINI I., BUCCI M., 1978, Piombino storia e arte, Piombino.
- TOGNARINI I., 1984, Siderurgia e miniere in Maremma tra '500 e '900 - Archeologia industriale e storia del movimento operaio, Firenze.
- TOGNARINI I., ROMBAI L., 1986, Follonica e la sua industria del ferro - Storia e Beni Culturali, Firenze.
- TRONQUART G., 1986, La sidérurgie au 'Camp Celtique' de la Bure (Samt-Dié) bilan de vingt ans de recherches (1964 - 1984), in "Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est XXXVII - 1-2", p. 29-43.
- TYLECOTE R. F., 1966, Le développement des techniques sidérurgiques en Grande Bretagne, in "Revue d'Histoire des mines et de la Métallurgie I - 2", p. 87-96.
- TYLECOTE R. F., 1979, A history of metallurgy, London.
- TYLECOTE R.F., 1985, The early history of the iron blastfurnaces, in "Medieval iron in society", p. 158-173.
- TYLECOTE R. F., 1987, Tire early history of metallurgy in Europe, Harlow.
- VAGLIA U., 1961, Il forno fusorio di Cemmo verbali della compagnia dal 1837 al 1883, in "Commentari dell'Ateneo di Brescia", p. 65-95.
- VENESIA P., 1979, Il Tuchinaggio in Canavese, Ivrea.
- VERGANI R., 1979, Lessico minerario e metallurgico dell'Italia nord-orientale, in "Quaderni Storici XIV", p. 54-79.
- VERGANI R., 1981, Una comunità mineraria di montagna - Riva d'Agordo, in "Annali della Storia d'Italia, n. 10", p. 613-648.
- VERNA C., 2001, Le temp des mouline Fer, technique et société dans les Pyrénées centrales (XIIIe-XVIe siècles), Paris.
- VODYASOV E.V., ZAITCEVA O.V., VAVULIN M.V., PUSHKAREV A.A., 2020, The earliest box-shaped iron smelting furnaces in Asia: New data from Southern Siberia, In "Journal of Archaeological Science: Reports - Vol. 31". <https://doi.org/10.17746/1563-0110.2023.51.2.074-084>.
- WHITE L., 1969, Technologie Médiévale et transformations sociales, Paris.
- WHITE K. D., 1986, Greek and Roman Technology, London.
- YAHALOM-MACK N., ELIYAHU-BEHAR A., 2015, The Transition from Bronze to Iron in Canaan: Chronology, Technology, and Context, in "Radiocarbon , Vol. 57 , Issue 2", pp. 285 - 305.

Indice

Presentazione	9
1. Note di geografia storica del ferro	11
1.1 Generalità	11
1.2 I poli mediorientali	12
1.3 Il polo ellenico	13
1.4 Il polo italiano	13
1.5 Il polo iberico	13
1.6 I poli centro-europei	16
1.7 I poli nord-europei	17
1.8 I poli nord-africani	18
2. La riduzione dei minerali in metallo	19
2.1 Il processo di riduzione	19
2.2 I prodotti della riduzione	28
3. Note di storia della siderurgia	41
3.1 L'origine pre- e protostorica	41
3.2 Il ferro nella Grecia antica	44
3.3 L'età romana	47
3.4 Il Medioevo	51
3.5 L'età Moderna	58
4. Circolazione dei tecnici e delle conoscenze	65
5. Note di diritto minerario	75
6. L'estrazione dei minerali	83
6.1 Preistoria, Protostoria ed età Ellenistica	84
6.2 Il mondo romano	89
6.3 Medioevo e Rinascimento	93
7. Preparazione del minerale	107
7.1 Frantumazione e selezione	107
7.2 Arrostimento	109
7.3 Sminuzzatura	112
7.4 Lavaggio	120

8. La riduzione del minerale in metallo	121
8.1 Il basso fuoco	126
8.1.1 Il basso fuoco a pozzetto	128
8.1.2 Il basso fuoco a catasta	130
8.1.3 Il basso fuoco catalano-ligure	137
8.2 Basso fuoco a camino e forno a manica	140
8.3 Dal forno a manica all'altoforno	147
8.4 Dall'altoforno a carbone di legna al carbon fossile	160
9. L'affineria	173
10. La fucina di trasformazione	177
10.1 La struttura materiale	178
10.2 L'impiego delle macchine	192
10.2.1 La comparsa dell'azionamento idraulico	198
10.2.2 I magli e i mantici meccanizzati	205
10.3 La struttura materiale del maglio	206
10.3.1 Il maglio frontale	206
10.3.2 Il maglio laterale	207
10.3.3 Il maglio frontale	210
10.3.4 Le berte	214
10.4 La struttura materiale del mantice	217
10.4.1 La batteria a camme	218
10.4.2 La batteria azionata dal sistema b/m	219
10.5 La tromba idroeolica	222
10.6 La mola	224
10.7 La trafileria	226
10.8 Il tornio	228
10.9 Altre macchine per la lavorazione del ferro	230
11 Dati per un'archeologia dei cicli produttivi	233
11.1 Procedimento diretto	233
11.2 Procedimento indiretto	235
12. Conclusioni	243
Note bibliografiche	249

Finito di elaborare
Maggio 2024

