

## Dall'arricchimento alla fusione: sistemi di concentrazione, tecniche estrattive e fusorie

### I preliminari: l'arricchimento del minerale

Prima di essere avviato ai forni fusori per ottenere il metallo, il minerale doveva essere preliminarmente arricchito, rimuovendo meccanicamente il più possibile della ganga. La corretta e accurata esecuzione di queste operazioni preliminari rendeva più facile e vantaggioso il processo d'estrazione: è stato ad esempio osservato come ciò consentisse di ridurre la quantità sia di combustibile che di scorificante. Poteva inoltre influire sulla presenza di elementi minoritari nel metallo prodotto e quindi, in definitiva, sulla qualità stessa dell'oggetto finito.

I minerali erano frantumati e i pezzi ottenuti selezionati a mano tenendo conto del colore e del peso. Secondo i resoconti etnografici, mediante un simile trattamento i minerali cupriferi che erano avviati alla fusione nella regione iraniana di Semnan avevano percentuali di Cu del 20-25%, mentre i BeYeke del Congo riuscivano addirittura a ottenere carbonati con un tenore di rame intorno al 40%.

Generalmente i pezzi erano poi macinati finemente e il ricavato veniva sottoposto al lavaggio, in modo da separare il metallo dai residui di roccia sfruttando la differenza di peso specifico: una corrente d'acqua infatti permetteva che il minerale metallico, più pesante, si depositasse, mentre lo sterile veniva rimosso e portato via. I grani di materiale tritato raggiungevano generalmente dimensioni millimetriche, anche se in alcuni casi, come per l'oro, si otteneva una polvere «fine come farina».

Un ingegnoso sistema di laverie è quello rinvenuto presso le miniere greche del Laurion, di età classica, che impiegava una corrente idrodinamica<sup>3</sup>. Da una vasca primaria d'alimentazione l'acqua colava lentamente su dei piani di legno scanalati, lievemente inclinati, nelle cui cavità si depositava il minerale; essa scendeva quindi, attraverso un sistema di canali, nei bacini di decantazione, da dove, tornata limpida, veniva riciclata per alimentare la vasca primaria (fig. 1).

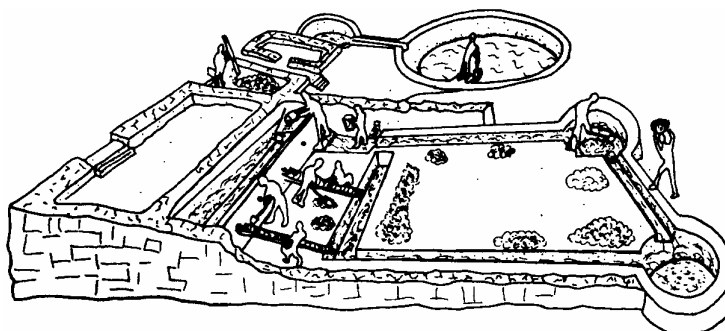


Fig.1 rappresentazione schematica delle operazioni nelle laverie del Laurion

Specie nel caso fosse stato finemente tritato, il minerale arricchito poteva essere preliminarmente inglobato in palle di sterco animale prima di essere posto nella fornace, per favorire la circolazione dei gas durante la fusione.

### I processi estrattivi

Per effettuare efficacemente l'estrazione del metallo dal minerale era necessario disporre di un qualche tipo di fornace, nella quale si potesse ottenere, mediante opportuno tiraggio, la temperatura sufficiente a raggiungere il punto di fusione. Si consideri, tuttavia, che il punto di fusione di un minerale è generalmente più basso di quello del suo metallo puro: nel caso dei minerali cupriferi tale temperatura può anche aggirarsi sugli 800 °C, sebbene il rame puro fonda a 1083 °C. Il combustibile era costituito da carbone di legna, che forniva anche l'indispensabile atmosfera riducente.

Il sistema più semplice di estrazione era quello che partiva da ossidi e carbonati: aveva luogo una complessa reazione chimica che produceva, oltre al metallo, dei gas e una scoria contenente i materiali di scarto. Nelle sue linee essenziali la reazione può essere così schematizzata:

Minerale + Calore + Agente riducente → Metallo + Scoria + Gas

Fig. 2

Perché questa possa svolgersi è necessaria l'assenza (o almeno scarsità) di ossigeno, ottenuto circondando e coprendo il minerale con carbone, affinché si trovi nella zona riducente del fuoco. In tal modo l'ossigeno legato al metallo nel minerale si combina con il monossido di carbonio (CO) emesso dal carbone: si formano così il metallo e l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), che essendo allo stato gassoso si disperde nell'aria.

Talora poteva rendersi necessario aggiungere delle sostanze fluidificanti (o scorificanti) per rimuovere, sotto forma di scoria, il materiale indesiderato che non era stato possibile eliminare con l'arricchimento. Nel caso, frequente, di ganghe quarzose, il fluidificante era costituito da ossidi di ferro.

Qualora il minerale di partenza fosse stato costituito da solfuri anziché da ossidi o carbonati, necessitava un trattamento preliminare di arrostimento, effettuato su cataste di legna in presenza di aria; esso consentiva di ossidare il metallo eliminando non solo lo zolfo, ma anche elementi volatili come arsenico, antimonio e bismuto. L'ossido così ottenuto veniva quindi avviato al processo estrattivo già descritto.

Per ottenere all'interno della fornace le alte temperature richieste per la fusione, bisognava ravvivare la combustione mediante l'immissione di forti getti d'aria. A questo scopo si utilizzarono inizialmente dei cannelli ferruginatori nei quali veniva soffiata l'aria, tubi di canna o di cuoio arrotolato muniti all'estremità di un ugello di argilla refrattaria, quali sono osservabili in rilievi e dipinti di tombe egizie. Verosimilmente successiva è l'introduzione dei mantici in pelle animale, di diverse fogge, azionabili manualmente o con i piedi; essi terminavano in un ugello di argilla (tuyère) per convogliare e dirigere il getto all'interno della fiamma (fig. 2). Con l'avvento del mantice, il cannello ferruginatorio venne relegato a scopi particolari, come la saldatura.

### **I forni: la lettura delle evidenze archeologiche**

Un problema preliminare da considerare nello studio delle antiche fornaci è quanto i loro resti siano realmente rappresentativi dell'intera struttura. Il forno fusorio infatti era realizzato con uno scopo eminentemente pratico, l'estrazione del metallo, ed era quindi destinato a essere smantellato del tutto o in parte, o abbandonato al degrado non appena cessava di svolgere la sua funzione.

La deformazione delle pareti causata dalle alte temperature raggiunte, l'accumulo di materiale di scarto e la necessità talvolta di recuperare il metallo rimasto all'interno hanno concorso a lasciare solo rare tracce degli impianti. Queste sono generalmente limitate alle parti più basse e alle fondazioni dei forni, che talvolta venivano realizzate al di sotto della camera per non disperdere la temperatura a contatto del suolo; l'alzato è invece andato quasi sempre perduto e con esso, spesso, anche il punto d'inserzione degli ugelli, che fornisce importanti dati sul numero e il posizionamento dei mantici.

Non è inoltre agevole, ad un primo esame, riconoscere la presenza o meno di un'eventuale incamiciatura delle pareti interne, facilmente confondibile con lo strato scorificato che si produce sulle superfici esposte ai processi fusori.

### **Evoluzione dei forni fusori**

Le tracce archeologiche lasciate dagli antichi processi estrattivi sono spesso assai labili: dapprima debbono essere stati usati semplici sistemi di estrazione in crogiolo, che non necessitavano di veri forni, né di mantici, e che praticamente non producevano scorie. Le più antiche fornaci dovevano consistere in forni a pozzetto assai semplici, per lo più depressioni o buche nel suolo, del diametro di una cinquantina di centimetri, per contenere il minerale e il combustibile.

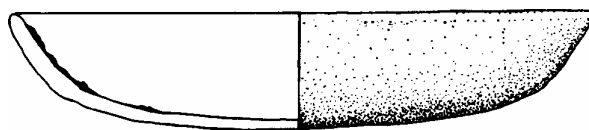
Un esemplare calcolitico scoperto a Wadi Madsus, presso Feinan, nella Giordania meridionale, è piuttosto un focolare delimitato da pietrame dalle dimensioni ridotte (una sessantina di centimetri di diametro); probabilmente a una simile funzione assolveva il focolare circolare contornato da un basso muretto anulare di argilla di circa un metro di diametro rinvenuto in Spagna a Los Millares, dell'età del rame.

Da qui, come da altri siti iberici databili dal Calcolitico all'età del ferro, provengono anche delle comuni e larghe scodelle d'impasto prive d'alcun trattamento particolare, usate in funzione di forno, i cosiddetti «vasi-forno» (*vasijas-horno*); la loro superficie interna si presenta parzialmente vetrificata e scorificata, indizio che la fonte di calore era posta dentro il recipiente (fig. 3). Il prodotto finale dell'estrazione era costituito da grosse gocce metalliche inglobate dentro un composto scoriaceo costituito da minerale non ridotto e residui di combustibile:

era quindi necessario rompere il contenitore e frantumare la scoria per recuperare il metallo. Questa tecnica, sebbene primitiva, consentiva il trattamento non solo di ossidi e carbonati, ma anche di solfuri; essa è stata segnalata, oltre che in Spagna, anche in Anatolia (Norsun Tepe, Bronzo antico) e a Cipro (Enkomi e Kition, Bronzo finale).

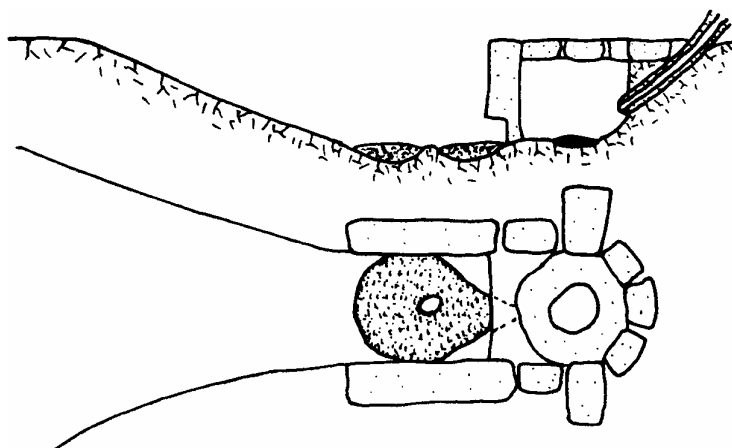
Una forma intermedia fra i focolari e le vere fornaci sembrano essere le strutture presenti a Feinan in contesti del Bronzo antico, dal diametro di circa 60 cm e alte apparentemente intorno ai 40 cm, parzialmente aperte su un lato nella direzione dei venti prevalenti, che dovevano evidentemente fornire l'aria necessaria alla combustione.

Un esempio più evoluto è rappresentato dal forno del Sito 39 della Valle di Timna presso il Wadi Arabah, nel Negev, della fine del IV millennio a.C., costituito da un pozzetto concavo profondo circa 40 cm, sormontato da una sovrastruttura in pietre alta altrettanto, con un diametro di 45 cm. Le scorie rinvenute indicano che l'estrazione del rame che vi si effettuava già utilizzava tecniche



**Fig. 3** Ricostruzione di «vaso-forno» rinvenuto ad Almizaraque (Spagna) (diam. cm 45) (da Montero Ruiz 1993).

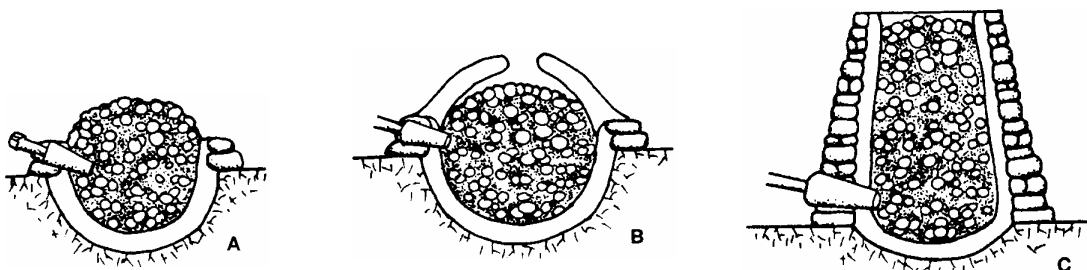
scorificanti. Gli scarti della fusione si accumulavano però nel forno rendendo necessario di quando in quando interrompere le operazioni fusorie per rimuoverli.



**Fig. 4** Forno di Timna, con buca per l'evacuazione della scoria (da Tylecote 1976).

E' stato calcolato infatti che la fase di riscaldamento di una fornace necessitasse di circa 20 kg di carbone, cioè di un quarto del combustibile necessario all'intera operazione. Con l'impiego di un

forno che consentisse di operare a ciclo continuo, permettendo il deflusso della scoria, il metallo poteva invece accumularsi nel corso dell'estrazione senza che fosse necessario svuotare il forno dei materiali di scarto. Pure da Timna provengono alcune delle scarse testimonianze di forni del tardo Bronzo, databili al XIV-XII secolo a.C.: sono dei pozzetti scavati nel terreno sabbioso e hanno forma pressoché cilindrica; le loro dimensioni sono di una sessantina di centimetri sia di altezza che di diametro. Le pareti sono incamiciate, ma la principale caratteristica consiste in una larga buca scavata di fronte per permettere la solidificazione e l'agevole rimozione della scoria, che defluiva allo stato fuso da un'apertura praticata a tale scopo sul davanti (*tapping*) (fig. 4). Quest'ultima caratteristica si osserva anche nelle fornaci più tarde, del X-VIII secolo a.C., oltre che in quelle romane e antico-islamiche, in forni sia del tipo a tino con pozzetto che a cupola". In area alpina appare invece diffuso durante l'età del bronzo un tipo di forno quadrangolare, con una muratura a secco rivestita di argilla (fig. 6).



**Fig. 5** Esempi di fornace: A) a pozzetto; B) a cupola; C) a tino (da Rothenberg 1990).

Se ne hanno esempi sia nelle Alpi Orientali austriache, che in Trentino, dove in località Acquafredda (Bedollo) sono stati rinvenuti ben nove forni ricavati in batteria entro una struttura di pietrame, il cui spazio fusorio era incamiciato con argilla e apparentemente privo di chiusura frontale.

Anche nella siderurgia si utilizzarono forni a pozzetto (*bowl furnace*), a cupola (*domed furnace*) e a tino (*shaft furnace*) (fig. 5).

L'intensa attività industriale sviluppatasi dalla fine del VI agli inizi del III secolo a.C. sulla costa antistante all'Isola d'Elba, fonte di approvvigionamento del minerale, nell'area di Populonia e di Follonica, ha lasciato cospicue tracce dei forni utilizzati dagli Etruschi per l'estrazione del ferro. Questi avevano la camera di fusione in mattoni e ciottoli ed erano parzialmente scavati nel terreno; un'apertura sul fondo, verosimilmente chiusa con materiale refrattario, permetteva la fuoriuscita della scoria nel corso delle operazioni.

I Romani impiegarono sia forni a cupola che a tino, con una buca frontale per l'evacuazione della scoria, un accorgimento tecnico già visto a Timna, ma che essi diffusero in tutte le regioni del loro impero, e che continuò nell'uso anche in età medievale.

Nel Medioevo, per la scarsità del carbone di legna, iniziò l'estrazione e l'impiego del carbon fossile nelle forge, pur senza giungere a soppiantare il carbone di legna; intorno al XIII secolo in Toscana e in Italia settentrionale, come pure in Inghilterra, i fabbri ne facevano ampio uso soprattutto nelle prime fasi di lavorazione del ferro. Si sviluppò inoltre l'impiego dell'energia idraulica nell'azionare mantici e magli. Nella tipologia delle fornaci si assiste alla convivenza di forme antiche con altre nuove, di tipo più o meno permanente, come il forno corso e quello catalano. Fu solo, però, nell'Italia del Cinquecento che apparvero i primi veri altiforni (*blast furnace*), sviluppatasi per progressiva evoluzione dai forni a tino romani, che consentirono la produzione su larga scala della ghisa.

### Le scorie

Le scorie costituiscono di norma la più evidente testimonianza delle attività fusorie; si hanno scorie ottenute dai processi estrattivi, da quelli fusori (come la purificazione o l'alligazione), dalla forgia.

Le antiche scorie metallurgiche sono composte da silicati ferrosi, indipendentemente se siano o meno legate alla produzione di ferro o di metalli non ferrosi; talora contengono al loro interno sia metalli puri, che ossidi, fosfati, borati, solfuri e carbonati, presenze queste dovute a residui di minerale non fuso.

Esse variano nel colore (sebbene tendano generalmente al nero o al grigio-nerastro), nella tessitura (a seconda della maggiore o minore fluidità allo stato fuso), nella porosità, nell'odore (durante le operazioni di taglio le scorie derivate dalla riduzione di solfuri emettono un caratteristico odore di zolfo, mentre quelle legate alla riduzione del ferro odori ferruginosi), nel peso specifico (comunemente elevato), nel magnetismo (talora presente nelle polveri).

Di norma il solo esame ottico di una scoria non consente di stabilire a quale metallo sia connessa ed è quindi necessario ricorrere a indagini di laboratorio; talora possono però essere presenti sulla superficie delle chiazze verdastre, legate a prodotti di alterazione del rame, che indicano un rapporto con la metallurgia di materiali cupriferi.

Più agevole è distinguere le scorie di fornace da quelle di colata (*tapped*), defluite da un'apposita apertura del forno: queste ultime hanno una superficie liscia con lunghi corrugamenti legati allo scorrimento, più marcati nel caso di elevata viscosità della scoria allo stato fluido (fig. 7).

**Fig. 6** Riproduzione di forno protostorico del modello delle Alpi Orientali.





**Fig. 7** Scorie di deflusso etrusche, da Populonia.

Oltre all'ispezione visiva, necessariamente preliminare, lo studio delle scorie deve comprendere l'indagine della composizione chimica (per via umida o mediante spettroscopia di emissione, assorbimento atomico, fluorescenza X, ecc.) e della composizione della fase, cioè lo studio dei composti in esse contenuti (tramite microscopia ottica ed elettronica, diffrazione X).

Nella metallurgia dei metalli non ferrosi è spesso necessario riconoscere le scorie da estrazione da quelle connesse con la fusione, che si formano nel crogiolo; un problema non facile, ma che può essere risolto esaminando la composizione chimica. Le scorie estrattive sono essenzialmente costituite da silicati ferrosi, ricche di ferro e povere di altri metalli; un comportamento opposto si riscontra invece nelle scorie da fusione che, sebbene varino in composizione, contengono invece sempre metalli non ferrosi e un tenore di ferro assai più basso delle altre; inoltre talora conservano anche della cenere di legna.



#### ***La colata in forma***

Per fondere il metallo e per permettere l'alligazione è necessario disporre di fornaci in argilla o in pietra atte a contenere il combustibile necessario a raggiungere la temperatura richiesta, previa opportuna ventilazione, ottenuta con l'ausilio di cannelli o mantici muniti di ugelli fittili.

Il metallo, eventualmente anche ricavato da vecchi oggetti rotti destinati alla rifusione, veniva posto in un crogiolo. Una volta liquido veniva poi colato nell'incavo di una matrice, di cui solidificando avrebbe riprodotto in positivo la forma (fig. 8). Le matrici potevano essere realizzate in argilla, in pietra (spesso steatite), in un impasto a base di sabbia o anche in lega di rame.

**Fig. 8** Matrice di fusione per pugnale, da 5. Agata Bolognese (Bronzo medio) (foto Civici Musei di Bologna).

Le più primitive consistono in una lastra litica opportunamente scavata (matrici univalvi), che consentivano però di ottenere unicamente piccoli oggetti piatti; esse venivano verosimilmente coperte con una pietra piatta per evitare un'eccessiva ossidazione del metallo fuso.

Con l'età del bronzo si diffusero metodi di fusione maggiormente evoluti che ricorrevano a forme chiuse che permettevano di produrre manufatti in tondo. La matrice conteneva una cavità sagomata, che sarebbe stata riempita dal metallo cui avrebbe conferito la forma finale; per evitare di dover spaccare la matrice a ogni colata al fine di rimuovere il getto di fusione, questa era realizzata in più parti, generalmente due (matrice bivalve), fra loro combacianti.

La capacità di ottenere cavità nel getto di fusione (come nelle immanicature a cannone) mediante l'uso di «anime», pezzi di refrattario posizionati nella matrice in modo da corrispondere ai vuoti che si desiderava presenti nell'oggetto, consentì di produrre manufatti perfettamente mente funzionali con un considerevole risparmio di metallo (fig. 9).

Il metallo fuso veniva colato con un crogiolo tenendo la matrice verticale o un poco inclinata (fig. 10). Particolarmente problematica era la fuoriuscita dei gas, tanto che talora sulle forme venivano realizzati degli appositi canaletti, come si osserva sulla matrice multipla di un momento non avanzato del Bronzo finale per spade a lingua da presa rinvenuta a Pieverone (Torino). La

fusione risultava quindi paradossalmente migliore se le valve non si giustapponevano perfettamente, poiché altrimenti il getto sarebbe risultato poroso.

Il manufatto, una volta solidificato, veniva poi estratto dalla matrice per passare infine alle operazioni di finitura, come l'asportazione del cono di colata e la ribattitura; quest'ultima, oltre a incrudire il metallo, portava l'oggetto alla sua forma definitiva.

I getti in lega di rame tendono ad avere una certa porosità, evidente all'esame metallografico, causata dai gas che si sviluppano nel metallo durante la fusione, rimanendovi imprigionati.

### La tecnica della cera perduta

Per lavori di particolare finezza e specialmente nell'oreficeria e nella statuaria venne sviluppato il metodo della *cera perduta*, che permetteva di riprodurre fedelmente un pezzo realizzato prima in cera mediante sostituzione di questa con del metallo.

Il metodo più semplice e primitivo, tuttora utilizzato dagli artigiani di culture etnologiche, consiste nel modellare dapprima, minuziosamente, l'oggetto nella cera malleabile. Si applicano poi sul modello dei bastoncini pure di cera (o dei ramoscelli di sambuco, che inceneriscono completamente durante la cottura della forma), in modo da realizzare dei canali, e un cono di colata per l'afflusso del metallo fuso e la fuoriuscita dei gas. Lo si ricopre quindi uniformemente con un primo strato finissimo e fluido di materiale refrattario (argilla con aggiunta di altre sostanze, come corno bruciato, sterco, ecc. a impedire che la creta si spacchi con l'essiccazione) che ne riproduca in negativo i dettagli; vengono poi aggiunti altri strati sempre più grossolani e resistenti, fino a inglobarlo entro una forma. Quest'ultima, una volta indurita, è posta nella fornace affinché, con il riscaldamento, tutta la cera possa venire rimossa (da cui il nome di «cera persa»). La cavità così prodotta riproduce perfettamente la forma del modello ed è in essa che viene colato il metallo. Dopo che questo si è raffreddato, si rompe la forma, si asportano colatoi e montanti di sfiato — anch'essi ora di metallo — e si rifinisce la superficie (fig. 11).

Per realizzare il modello di partenza in cera vi erano vari metodi. La tecnica sopra descritta, la più semplice e antica, è detta *tecnica diretta piena*, poiché il modello in cera (e quindi l'oggetto metallico prodotto) era massiccio; era usata nell'oreficeria e nella produzione di piccoli bronzetti.

Quando si volevano invece ottenere manufatti cavi, come nel caso della grande statuaria, la cera da modellare veniva preliminarmente spalmata su un'anima in terracotta sufficientemente porosa da essere permeabile ai gas che si sarebbero sviluppati durante la colata. Per evitare che l'anima, all'interno, si spostasse durante la fusione a seguito della scomparsa della cera, venivano infissi nell'anima stessa dei chiodi metallici sporgenti (distanziatori) attraversando lo strato di cera e si ricopriva poi il tutto con la terra di fusione, procedendo quindi come nel caso precedente (*tecnica diretta cava*).

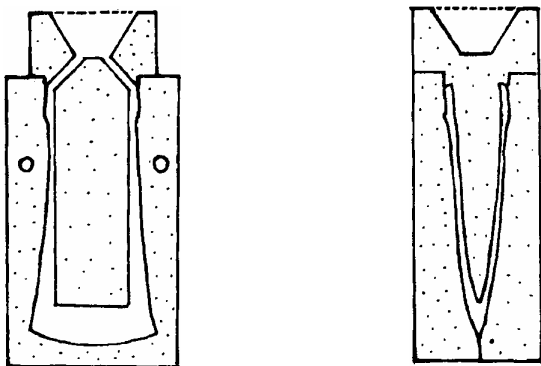
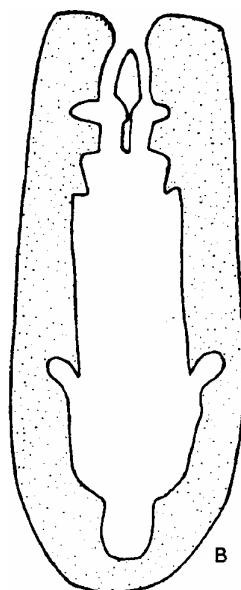


Fig.9 Schema di una matrice di fusione con anima in terracotta per asce a cannone (da Coghlan 1975).



**Fig. 10** Colata in una matrice bivalve durante un esperimento fusorio

Un po' diversa era la *tecnica indiretta*, che prevedeva invece di ricavare dall'originale una matrice negativa in gesso o terra, realizzata mediante due o più valve. All'interno della matrice veniva versata la cera liquida, che permetteva, solidificandosi, di ottenere un secondo modello in cera; era quest'ultimo che, previo ritocchi, veniva utilizzato per la fusione (*tecnica indiretta piena*). Nel caso si volesse effettuare una fusione cava, l'interno della matrice veniva ricoperto da uno strato uniforme di cera; la terra di fusione era quindi inserita nella cavità (*tecnica indiretta cava*). Il metodo indiretto salvava l'originale, permetteva tondo di produrre varie copie e consentendo all'artigiano di disporre nella bottega di una collezione di matrici facilmente riadattabili.



**Fig. 11** Fusione a cera perduta mediante tecnica diretta piena: il modello in cera (A); sezione della forma da esso ricavata (B).





La tecnica della cera perduta venne ampiamente usata nella gioielleria vicino-orientale sino dalla metà del III millennio a.C. e se ne hanno buoni esempi da Ur e dall'Egitto protodinastico. Essa raggiunse una particolare fioritura nella bronzistica cipriota intorno al XII secolo a.C., come dimostra l'elevato pregio artistico della statuette del cosiddetto «Dio di Enkomi», realizzata verosimilmente con il sistema diretto pieno. Furono probabilmente gli intensi contatti intercorsi nella tarda età del bronzo fra la Sardegna e Cipro a fare da tramite verso il bacino occidentale del Mediterraneo. I fonditori nuragici realizzarono con questa tecnica lavori di notevole qualità, quali barchette e bronzetti, e a loro volta contribuirono alla sua diffusione in Etruria, dove fra la fine dell'età del ferro e l'orientalizzante antico si innestò sulla matrice tecnico-culturale villanoviana (fig. 12).

La cera perduta venne ampiamente usata nel mondo greco-romano per produrre i grandi bronzi, che venivano modellati e fusi in più pezzi, sempre tenendo conto, però, dell'assemblaggio finale. I bronzisti facevano ricorso sia alla tecnica diretta che a quella indiretta —metodi entrambi ben conosciuti già prima del VI secolo a.C. — anche nell'ambito della stessa statua, a seconda delle caratteristiche della parte che si intendeva realizzare.

Nei grandi bronzi, necessariamente cavi, si ricorreva ad un'armatura interna in ferro per sostenere il nucleo in terra di fusione, come è osservabile, ad esempio, nella Lupa Capitolina e nei Bronzi di Riace; impiegando a tale scopo sbarre piene anziché cave, col tempo il ferro, dilatandosi per corrosione, poteva danneggiare l'opera.

**Fig. 12** Bronzetto etrusco di devota da Monte Acuto Ragazza (Bologna) (V sec. a.C.) ottenuto a cera perduta (tecnica diretta piena): si notino, sotto ai piedi, i canaletti di afflusso del metallo (foto Civici Musei di Bologna).

La tecnica della cera perduta venne impiegata anche in America dalle culture indigene precolombiane che realizzarono raffinati lavori di oreficeria utilizzando il metodo diretto, sia cavo che pieno.