

## T

**Tecnologie produttive** Un importante ambito della ricerca archeometrica (⇒ ARCHEOMETRIA) concerne lo studio delle tecnologie di produzione, fondamentali per ricostruire il grado di sviluppo delle società antiche.

Che tipo d'argilla è stato utilizzato per la creazione di un manufatto? È stato aggiunto degrassante? A che temperatura è stata cotta una determinata ceramica? Quali erano le atmosfere di cottura di una fornace? Di che natura è un pigmento? Come è stato fabbricato un oggetto metallico? Con quali materiali è stato fabbricato un oggetto in vetro? Sono solo alcune delle domande cui si può cercare di dare una risposta utilizzando i metodi di laboratorio, che ci consentono di indagare un oggetto partendo dalle sue caratteristiche fisiche.

Gli studi in laboratorio mirati alla comprensione e alla ricostruzione delle tecnologie produttive antiche, così come quelli che mirano alla DETERMINAZIONE D'ORIGINE (⇒), partono per lo più dallo studio della materia prima e dalla sua *caratterizzazione compositiva*. In sostanza, la materia viene studiata in virtù delle sue caratteristiche chimico-fisiche, che possono dare informazioni in più all'archeologo o allo storico dell'arte.

Per la ricostruzione delle tecniche di fabbricazione degli oggetti antichi esiste un numero ormai sempre crescente di tecniche di laboratorio (che sarebbe troppo lungo enumerare in questa sede), che vanno via via valutate a seconda del tipo di domanda che si pone e a seconda del tipo di materiale con cui è costituito l'oggetto che si vuole analizzare. Nelle pagine che seguono, sono presi in considerazione per sommi capi alcuni materiali e sono indicate alcune delle tecniche di fabbricazione adottate.

Esistono diversi stadi di ricerca per il tipo di indagini che vengono qui trattate. Le tecniche più semplici, non distruttive, riguardano un primo esame ottico delle superfici, con la lente o il microscopio. Il microscopio polarizzatore e il microscopio elettronico a scansione, che consentono ingrandimenti maggiori e il cui utilizzo è sempre più comune, prevedono l'asportazione di un campione e la sua preparazione (sezione sottile).

Per ciò che concerne lo studio della materia e delle composizioni, abbiamo a disposizione le analisi chimiche quantitative, che costituiscono in molti casi un approccio indispensabile.

Va infine ricordato che la ricostruzione delle tecnologie antiche non si avvale solo di strumenti tecnici di indagine: di grande utilità per la ricostruzione del patrimonio tecnologico di società del passato – se pur da applicare con una certa cautela – sono anche gli studi etnoarcheologici (⇒ ETNOARCHEOLOGIA). Si tratta di ricerche compiute su società contemporanee di tipo pre-industriale, per ricavare informazioni preziose sui modi di accostarsi alla materia prima, sulla lavorazione dei manufatti e sui cicli produttivi. Recenti ricerche effettuate sulla fabbricazione della ceramica in Marocco, per esempio, hanno consentito di riconoscere alcuni modelli relativi alle fasi di approvvigionamento della materia prima, della lavorazione, della cottura e dello smercio del prodotto finito in diverse aree del paese (Picon 1995).

In epoca recente gli aspetti tecnologici del passato sono stati studiati anche attraverso applicazioni sperimentali (⇒ SPERIMENTALE, ARCHEOLOGIA) che hanno lo scopo di capire meglio e ricostruire situazioni e processi tec-

nologici (per l'Italia, si vedano a titolo di esempio gli esperimenti relativi alle antiche officine del bronzo, Formigli 1991).

Per gli studi tecnologici, così come per quelli di determinazione d'origine, è fondamentale che esistano chiari obiettivi storici e archeologici, mentre è auspicabile che tendano a scomparire le indagini di laboratorio fini a se stesse, piuttosto diffuse in quest'ambito della ricerca archeometrica.

**CERAMICA** (⇒). Numerose ricerche di laboratorio sono state condotte su materiali ceramici di epoche diverse per approfondire problemi inerenti la tecnologia di fabbricazione. Grazie a tali studi possiamo stabilire la composizione della materia prima e caratterizzarla, verificare se contiene degrassante naturale oppure aggiunto intenzionalmente dal ceramista, stabilire se si tratti di ceramica tornita o meno, ricostruire le tecniche di rivestimento e decorazione, determinare atmosfere e temperature di cottura; inoltre possiamo sapere quali fossero le sostanze contenute nei recipienti antichi o indagare le tracce di utilizzo di un vaso.

Nell'ambito di una CLASSIFICAZIONE (⇒) di recipienti ceramici, determinare proprietà come la durezza o la porosità può fornire elementi in più per la ricostruzione della tecnica di fabbricazione adottata e contribuire alla formazione di gruppi di recipienti dalle caratteristiche tecniche analoghe.

Una serie di informazioni sulla materia prima utilizzata per la fabbricazione di un vaso può essere desunta da un accurato *esame autotipico* preliminare, in virtù del quale è possibile stabilire, per lo meno a grandi linee, con che tipo di argilla il vaso sia stato eseguito (per esempio, se si tratti di un'argilla calcarea o silicea) e avere qualche prima informazione sull'atmosfera di cottura e sulle modalità di rivestimento e lavorazione. Questo esame ha però dei limiti conosciuti e per andare più in profondità sono necessarie una serie di verifiche che sfruttino tecniche di laboratorio.

Già un esame effettuato con una lente o un *microscopio*, direttamente sull'oggetto, con-

sente un ulteriore passo avanti, senza che sia necessario il prelievo di un campione.

Una tecnica utilizzata per studiare la tecnologia di fabbricazione della ceramica (ma anche di metalli, legno, ossa e mummie) è la *xeroradiografia*, una via di mezzo tra la radiografia e la fotocopia, che consente una migliore visione dei contorni di un oggetto ceramico.

Per rispondere a quesiti più precisi, che coinvolgono la struttura della materia, è indispensabile procedere con tecniche più sofisticate, che spesso implicano l'asportazione di un campione dal recipiente; nel campo della microscopia, per esempio, la lettura al *microscopio a luce polarizzata* su sezione sottile (cioè di uno strato di ceramica trasparente, inglobato tra due vetrini, che lascia passare la luce filtrata attraverso dispositivi detti nicol o filtri polarizzatori) è spesso determinante per raccogliere informazioni sulla preparazione dell'impasto, per stabilire se esista un'ingubbiatura (e se essa sia costituita o meno dalla stessa argilla che forma il corpo ceramico del vaso), per indagare le modalità di stesura del colore o ancora le tecniche di modellamento e lavorazione (oltre che per identificare i minerali, la loro taglia e grandezza).

Grazie all'analisi in sezione sottile è possibile anche ricostruire dati tecnologici relativi al trattamento delle superfici, studiando, per esempio, l'orientamento dei minerali allungati (come le miche), la cui disposizione può dare informazioni sulla tecnica di lavorazione.

Il *microscopio elettronico a scansione*, che utilizza un fascio di elettroni e consente tra 100 e 100.000 ingrandimenti, permette l'identificazione di componenti minerali, oltre che lo studio di invetriature e pitture.

La *diffrazione* (Xrd, X-Ray Diffraction) è un metodo usato per caratterizzare la ceramica ed è basato sull'identificazione dei minerali e della loro struttura cristallina. Consente di ricavare informazioni sulle temperature di cottura delle ceramiche, attraverso il grado di trasformazione dei minerali argillosi; inoltre permette osservazioni sui rivestimenti e sulla loro natura. Il campione, opportuna-

mente preparato, viene colpito da un fascio di raggi X e viene misurata l'intensità della radiazione diffratta ad angoli differenti.

Per stabilire i componenti della ceramica (ma anche di scorie, pigmenti e materiali inorganici), vengono studiate le trasformazioni delle fasi minerali a varie temperature: ciò permette di individuare minerali argillosi come l'illite, la caolinite ecc. La presenza o l'assenza di tali componenti consente di trarre informazioni specifiche, quali per esempio quelle relative alla temperatura di cottura del vaso.

Per studiare le composizioni chimiche di un ingobbio o di un rivestimento vetroso è possibile usare la *microsonda* a energia dispersiva, un metodo di analisi chimica che consente lo studio di parti anche molto piccole (tra 0,002 e 0,1 mm), contribuendo alla determinazione di qualità e quantità degli elementi chimici.

Parte della terra sigillata di epoca romana - e in modo particolare la sua «vernice» - è stata studiata dal punto di vista tecnico grazie alla microanalisi, che ha permesso di conoscere la composizione chimica del rivestimento costituita da argilla illitica (ricca in ferro, potassio e alluminio) e di confrontarla con quella del recipiente vero e proprio. Molti studiosi pensano che si tratti della stessa argilla, ma più depurata, mentre studi recenti hanno dimostrato che, almeno in alcuni casi, come in quello delle terre sigillate prodotte nel sito de La Graufesenque, non si tratta della stessa materia prima (Picon 1997).

Molti sono i metodi a disposizione per studiare le temperature di cottura delle ceramiche e il processo della cottura. Si tratta di un settore importante delle ricerche tecnologiche basate sui fenomeni e sui cambiamenti che si verificano con la cottura dell'argilla; la composizione mineralogica di un campione ceramico dipende infatti principalmente da tre fattori: il contenuto in calcio dell'argilla, l'atmosfera del forno e la temperatura di cottura.

Una prima indicazione sulle temperature di cottura viene dall'individuazione dei minerali presenti in un campione ceramico; con l'aumento della temperatura, infatti, avvengono

nell'argilla cambiamenti di fasi e mentre alcuni minerali spariscono, altri si formano. Di grande importanza è quindi l'utilizzo sia del microscopio polarizzatore che della diffrattometria.

Per individuare con precisione le temperature di cottura vengono utilizzate anche le *analisi termiche*, l'analisi termica differenziale (Dta), l'analisi termogravimetrica (Tga) e la dilatomia (Tma). In base a queste analisi, un campione ceramico viene riscaldato in un forno e ne vengono misurati i cambiamenti chimici o fisici; le curve che si ottengono dalla misurazione della temperatura rispecchiano l'energia termica esercitata sul campione e il confronto con prove standard consente di stabilire la temperatura originaria di cottura. Grazie alla dilatomia è possibile misurare il coefficiente di dilatazione delle ceramiche, stabilendo se una ceramica poteva essere adatta alla cottura.

Talora è l'applicazione di più tecniche a contribuire alla risoluzione di quesiti relativi alla tecnologia di fabbricazione di ceramiche antiche. Per sapere, per esempio, come furono realizzate le ceramiche greche a figure rosse e a figure nere sono stati impiegati il microscopio elettronico, la diffrattometria e la microsonda.

Per la ricostruzione delle temperature di cottura o per indagini sul colore delle ceramiche, infine, sono spesso effettuati esperimenti di ricottura in laboratorio di campioni o di argille originarie.

**Metalli** (⇒ ARCHEOMETALLURGIA). Come per la ceramica, anche per i metalli un vero avanzamento della ricerca sarà possibile affrontando innanzi tutto lo studio dei siti di produzione (⇒ PRODUZIONE, ARCHEOLOGIA DELLA).

Le indagini di laboratorio effettuate sui metalli per avere informazioni relative alla tecnologia si distinguono tra quelle effettuate sulla materia prima e sulle tecniche estrattive del minerale (⇒ MINERARIA, ARCHEOLOGIA) e quelle condotte invece sul prodotto finito, cioè sull'oggetto metallico, perché i semilavorati sono rari.

Mettere in relazione un manufatto in metallo con un processo tecnico è piuttosto complesso, poiché la fabbricazione di un oggetto metallico comprende diverse fasi, dopo l'estrazione del minerale, la sua trasformazione in pane di metallo e le successive lavorazioni. Tali fasi, che hanno reso necessario l'utilizzo del fuoco, hanno prodotto delle trasformazioni nella materia - cui è possibile si siano aggiunte già in antico anche delle riparazioni dell'oggetto - che rendono le interpretazioni in laboratorio molto complesse e non sempre scontate. A ciò si sommano altri problemi causati dal fatto che i metalli potevano essere riutilizzati; anche i prodotti di corrosione che si riscontrano molto spesso nei manufatti metallici (⇒ DEGRADO) possono ostacolare le indagini sulle loro tecniche di fabbricazione, così come quelle tese a determinarne l'origine.

Tra le prime indagini che si possono effettuare su di un oggetto metallico ci sono quelle tese a conoscerne la composizione, specialmente se si tratta di leghe. L'analisi chimica ha contribuito a dare importanti informazioni in questo senso, per quanto non esistano molti dati definitivi sull'argomento. Lo sviluppo dei metodi spettrografici ha consentito di ridurre il volume dei prelievi da un manufatto, permettendo comunque la misurazione di elementi maggiori o in traccia.

Tra le analisi che consentono di determinare le composizioni chimiche dei metalli rientra la *spettrometria di assorbimento atomico* (Aas, *atomic absorption spectrometry*); su principi analoghi - ma si tratta di una tecnica più recente - si basa la *spettrofotometria di emissione con sorgente a plasma* (Icps, *inductively coupled plasma emission spectrometry*), che consente di stabilire piuttosto rapidamente le composizioni dei campioni. Della *fluorescenza a raggi X* e dell'*attivazione neutronica*, che consentono l'analisi qualitativa e quantitativa degli elementi chimici, già si è parlato in relazione alla DETERMINAZIONE D'ORIGINE (⇒).

La *spettrometria indotta da eccitazione da protoni* (Pixe, Pige, Pigme) consente l'analisi di materie inorganiche senza che sia necessa-

rio il prelievo di un campione ed è stata utilizzata, nel campo dei metalli, per studiare, per esempio, monete antiche. Si tratta di un principio simile a quello della fluorescenza a raggi X e dell'attivazione neutronica, ma l'emissione di raggi è indotta da bombardamento protonico.

La *spettroscopia di Mössbauer*, che comporta la misurazione delle radiazioni gamma assorbite dai nuclei del ferro, viene utilizzata non solo per studiare le condizioni di cottura della ceramica, ma anche per le patine di degradazione e corrosione dei metalli.

Anche l'*analisi isotopica*, di cui si è parlato a proposito delle determinazioni di origine, è un importante metodo di caratterizzazione degli oggetti metallici.

Tra i metodi ottici, la *radiografia* è quello che viene maggiormente utilizzato, spesso in ambito museale, per potere vedere all'interno di oggetti non trasparenti o individuare la forma, la tecnica e la decorazione, là dove esistono abbondanti prodotti di corrosione.

L'analisi al *microscopio metallografico* consente di determinare le tecniche di fabbricazione di un oggetto in metallo, se è stato battuto a freddo o ricotto o se è stata effettuata la fusione in forma, oppure se sono state usate tecniche miste.

Il microscopio a luce diretta consente di fare le prime osservazioni sulla struttura del metallo partendo da un campione prelevato e opportunamente preparato. In modo particolare, vengono evidenziati i tipi di metallo utilizzati e le tecniche di lavorazione. Il *microscopio elettronico a scansione* viene utilizzato per studiare la struttura dei metalli e i prodotti di corrosione.

Per lo studio di complicate tecniche di lavorazione di oggetti metallici di diversa natura vengono utilizzati *raggi X* e *gamma*; essi consentono di individuare le leghe metalliche o di misurare lo spessore delle pareti. Inoltre è possibile fotografare l'interno di oggetti metallici cavi.

Anche la *tomografia* consente ricerche approfondite in modo particolare su oggetti concavi, come statuette, di cui viene messo in

evidenza il nucleo e lo spessore delle pareti. Con questa tecnica i raggi si muovono circolarmente intorno all'oggetto, consentendo di vedere la sezione interna.

Per lo studio delle patine che si formano sui metalli, per esempio sui bronzi, viene usata la diffrazione a raggi X.

**Vetro.** Per la fabbricazione del vetro sono necessarie due componenti: la silice (sabbia, quarzite o selce) e uno o più fondenti, rappresentati di solito da piombo o alcali (sodio, potassio), calcio e magnesio, o da cenere vegetale che li contiene. A queste due componenti fondamentali si potevano aggiungere poi uno stabilizzatore e, eventualmente, dei colori (ottenuti spesso con l'aggiunta di composti metallici, per esempio il rame e il ferro per ottenere il colore verde) o degli opacizzanti.

La fabbricazione del vetro comprendeva diversi processi, che prendevano avvio dalla mescolanza di sabbia e fondenti, introdotti nella fornace; il materiale ottenuto veniva poi raffreddato in acqua e quindi fuso e degasato per farne vetro.

Una prima serie di informazioni sulla tecnologia di fabbricazione di manufatti vitrei è ottenibile grazie a una lente, che consente di individuare gli inclusi oppure le bolle d'aria. Analisi di laboratorio vere e proprie consentono di individuare e quantificare le concentrazioni dei diversi elementi e di ricostruire, almeno in parte, le ricette originarie. Sulla base dei diversi materiali utilizzati e delle loro componenti chimiche è possibile suddividere i vetri antichi in circa dieci gruppi diversi.

Grazie a indagini effettuate sappiamo, per esempio, che i vetri romani, tra I e V secolo d.C., hanno in Occidente e in parte anche in Oriente, composizioni stabili (la silice, per esempio, si aggira intorno al 65-70 per cento, mentre i valori di  $\text{Na}_2\text{O}$ , che è il fondente principale, oscillano tra il 16 e il 20 per cento); è stato recentemente ipotizzato che per i vetri romani sia stata utilizzata in officine diverse la stessa sabbia (Picon 1997).

Per quanto riguarda le tecniche di laboratorio più utilizzate per lo studio del vetro, che

consentono analisi qualitative e quantitative, ricordiamo la *spettrofotometria di assorbimento atomico* (Aas) e la tecnica simile, ma più recente, della *spettrofotometria di emissione con sorgente a plasma* (Icp), che consente di misurare circa 30 elementi sia maggiori che in traccia.

Anche per la caratterizzazione dei vetri è possibile utilizzare la spettrometria indotta da eccitazione da protoni (Pixe, Pige, Pigme).

**Pigmenti e colori.** Analisi di laboratorio possono essere impiegate anche per stabilire che tipo di pigmenti e colori siano stati adoperati in antico, oppure per conoscere la natura delle sostanze utilizzate, se naturali o preparate artificialmente.

Tra i metodi più frequenti va ricordato il microscopio ottico e, se necessario, quello elettronico, capace di maggiori ingrandimenti, oppure la (micro)spettrometria d'assorbimento, che associa l'utilizzo di un microscopio ottico a uno spettrografo, apparecchio che misura precisamente la luce rinvia da un oggetto dando per ciascun colore i valori di intensità luminosa. Lo stesso strumento può essere utilizzato per indagare la natura dei pigmenti. Per caratterizzare pigmenti naturali contenenti ferro è possibile utilizzare la spettroscopia di Mössbauer.

**Materie organiche.** Anche se è abbastanza raro, è possibile che uno scavo archeologico restituisca tracce di materiale organico, come alimenti, unguenti o fibre vegetali, conservate in quantità tali da poter essere analizzate.

Tali sostanze si conservano se preservate dalle ossidazioni chimiche o dal DEGRADO (⇒) batterico; esse sono costituite per lo più da carbonio, idrogeno, talvolta fosforo e zolfo e non possono essere indagate con tecniche elementari, come succede per i minerali, poiché le percentuali di tali elementi non forniscono dati sufficienti per consentire di ricostruire i composti. È quindi necessaria un'analisi di tipo molecolare come la *spettrometria a infrarossi* o la *cromatografia*, che ricostituiscono l'edificio molecolare del materiale analizzato.

La cromatografia, per esempio, consente l'analisi qualitativa e quantitativa di alcune so-

stanze organiche, come i resti di cibo. Per tale tipo di analisi è sufficiente avere a disposizione quantità anche molto piccole di sostanze - per esempio i grassi - rimaste nei pori delle ceramiche.

E. Formigli, *Antiche officine del bronzo. Materiali, strumenti, tecniche*, Siena 1993; Id., *I grandi bronzi antichi*, Siena 1999; R. Francovich (a cura di), *Archeologia delle attività estrattive e metallurgiche* (Pontignano 1991), Firenze 1993; A. Gara, *Tecnica e tecnologia nelle società antiche*, Roma 1994; C. Giardino, *I metalli nel mondo antico. Introduzione all'archeometallurgia*, Roma-Bari 1998; T. Mannoni, *Archeologia delle tecniche produttive. Venticinque anni di archeologia globale*, Genova 1994; T. Mannoni, E. Giannichedda, *Archeologia della produzione*, Torino 1996; M. Picon, *L'atelier de verrier de Lyon du Ier siècle après J.-C. et l'origine des verres «romains» e Les argiles des vernis rouges et jaunes des céramiques sigillées de la Graufesenque (Aveyron) et la céladonite utilisée comme pigment vert dans les peintures murales romaines*, in «Revue d'Archéométrie», 21, 1997, pp. 81-87 e 89-96.

GLORIA OLCESE

**Telerilevamento** Il telerilevamento è definibile, nella sua accezione più lata, come l'insieme di tecniche e metodi che permettono l'analisi di «oggetti» o di «fenomeni» ambientali (fisico-biologici), attraverso misure radiometriche registrate a distanza da sensori installati su piattaforme terrestri (treppiede, elevatore), aeree (pallone, aeroplano) o spaziali (satellite, navetta).

Esso è considerato dai più come disciplina relativamente giovane, sviluppatasi contestualmente alla comparsa delle prime immagini riprese dallo spazio agli inizi degli anni Sessanta e ricollegabile soprattutto alla classificazione delle «firme spettrali» in campo agricolo.

Il significato etimologico del termine, tuttavia, rimanda a un ambito molto più ampio, costituito da tecniche di ripresa e da metodi

di elaborazione e interpretazione delle immagini le cui origini risalgono alla metà del secolo scorso e il cui sviluppo continua ininterrotto sino al presente (⇒ DIAGNOSTICA ARCHEOLOGICA). In particolare, l'approfondimento concettuale del «processo interpretativo», compiuto via via dagli studiosi con il superamento della semplice fase di «lettura» (identificazione dei soli oggetti di superficie) e lo svolgimento della fase «deduttiva» (ricognoscimento della presenza di strutture obsolete o sepolte), ha permesso di applicare con successo fin dagli anni Trenta il telerilevamento alle scienze della Terra e in seguito allo studio del paesaggio, sovente molto antropizzato e ricco di emergenze archeologiche.

Il telerilevamento, quindi, sotto questo aspetto rappresenta uno strumento integrato di indagine che si articola in fasi connesse tra loro a cascata, quali l'acquisizione dei dati, la loro elaborazione sia analogica che digitale, la raccolta degli elementi di campagna per stabilire la cosiddetta «verità-terreno» (termine di riferimento essenziale durante il successivo stadio di analisi), l'interpretazione delle «immagini» e da ultimo il controllo diretto delle chiavi interpretative.

Esso riveste inoltre un carattere spiccatamente *interdisciplinare*, poiché offre elementi di speculazione che possono essere approfonditi collegialmente da diverse scienze o discipline (geologia, geomorfologia e archeologia, per esempio), interessate a valutare le varie componenti di una tematica complessa come i mutui rapporti tra uomo e risorse naturali nel tempo.

L'inizio della storia del telerilevamento si può porre nel 1839, quando fu scattata la prima immagine fotografica ad opera di D. J. M. Niepce e Niepce. Nel 1840 Arago, direttore dell'Osservatorio di Parigi, utilizza fotografie a fini cartografici, mentre G.F. Tournachon nel 1848 compila carte topografiche da fotografie prese da un pallone innalzato ad alcune centinaia di metri sopra l'abitato di Petit Bicêtre, nei dintorni di Parigi. Nel 1860 J.W. Black e S. King, a bordo del pallone «Queen of the air», fotografano parte della città di Boston,