

ISTITUTO STATALE D'ARTE "P. SELVATICO" PADOVA

Prof. Gobbo Adelio

a.s. 2012/13



Alcune annotazioni sulle origini del ferro e dell'acciaio

Gli albori dell'età del ferro

Gli uomini primitivi conoscevano da epoche immemorabili "il metallo venuto dal cielo", o, se più vi piace, il ferro, spesso contenuto nelle meteoriti che di tanto in tanto arrivavano sulla terra.

Ovviamente la rarità del ferro meteoritico era tale che questo metallo non poteva certo soddisfare le esigenze quotidiane, non potendo quindi competere né con il rame né, successivamente, con il bronzo.

Quando la metallurgia estrattiva consentì di utilizzare come materie prime i vari minerali, affioranti in superficie, il quadro, almeno in termini di risorse, dovette tuttavia cambiare drasticamente.

È infatti noto che i minerali di ferro sono molto più diffusi, sulla crosta terrestre, rispetto a quelli del rame. Qualcuno sicuramente, prima o poi, si decise di usare certe "terre rosse", molto più abbondanti delle "terre verdi", che fino ad allora erano state usate per ottenere il rame. Il risultato del processo estrattivo fu l'ottenimento di una vecchia conoscenza: il ferro, quel ferro che prima di allora solo di tanto in tanto veniva inviato dagli dei, direttamente dalla loro sede.

La scoperta risale, secondo i più recenti studi a epoche lontane, addirittura prima dell'età del bronzo. Come tutte le attività umane anche la metallurgia del ferro, o, come si dice più modernamente, la siderurgia, non poteva certo competere con l'abilità degli dei e il "ferro degli dei" (con i limiti di disponibilità più sopra indicati) rimase per molto tempo superiore a quello prodotto dagli umani.

In ogni caso fino alla fine del II millennio a.C. il ferro ebbe un ruolo decisamente trascurabile nella storia delle varie civiltà.

Per poter capire come da metallo quasi inutile (IV millennio a.C. fino alla fine del II millennio a.C.) il ferro sia diventato il metallo per eccellenza, dal 1200 a.C. a oggi, occorre entrare nel dettaglio del suo processo di produzione.

La produzione del ferro nel mondo antico

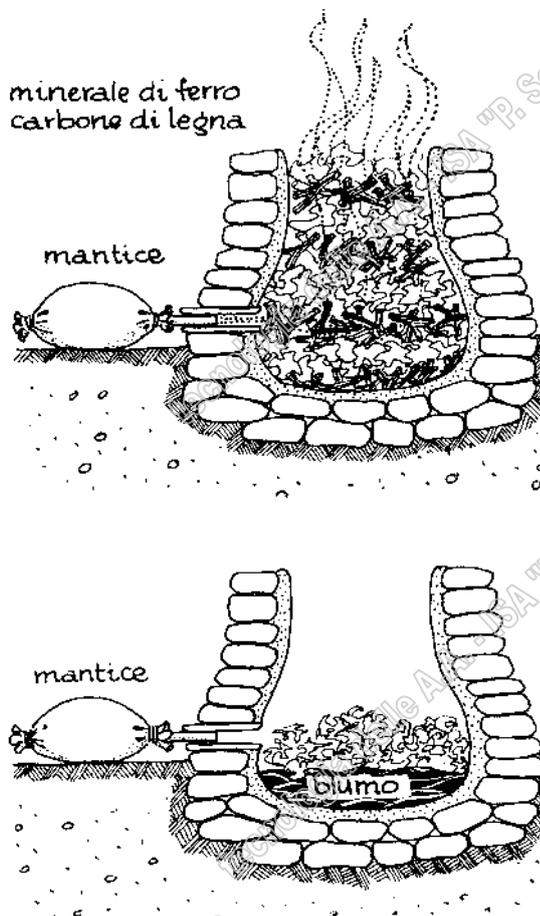


Figura 1- Un antico forno riempito di minerale di ferro e carbone di legna. Si accendeva la carica e si immetteva aria forzata portando la temperatura del forno a circa 1100 °C. Siccome il ferro fonde solo a 1540 °C, alla temperatura di 1100 °C non si ottiene materiale liquido, ma un materiale spugnoso, il blumo (vedi figura successiva).

I metodi antichi per ottenere ferro lavorabile a partire dai suoi minerali, si possono ricondurre a due processi fondamentali:

- eliminazione dell'ossigeno dai composti di ferro contenuti nel minerale mediante un riscaldamento ad alte temperature con carbone di legna;
- eliminazione delle impurezze e delle sostanze estranee (scorie) e dell'eventuale eccesso di carbonio presente nel materiale ottenuto con il primo processo.

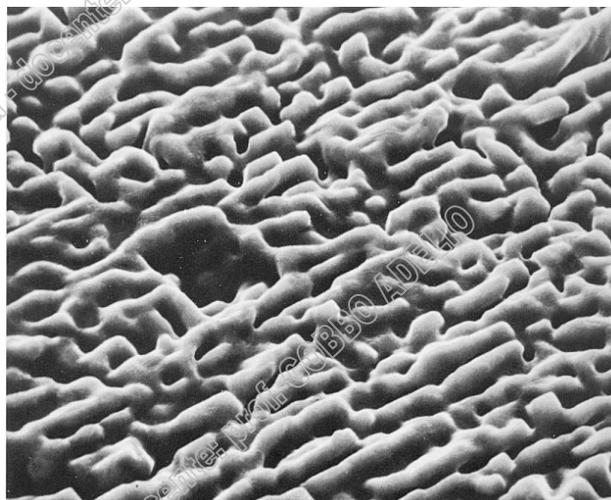
Gli antichi fabbri producevano il ferro a partire dal minerale, prevalentemente ematite (Fe_2O_3) o magnetite (Fe_3O_4), riscaldandolo in un forno, detto bassofuoco e utilizzando come combustibile il carbone di legna.

Con questi forni primitivi sembra però che non fosse

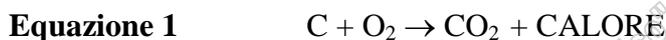
possibile raggiungere temperature molto superiori a 1100 °C. Noi sappiamo però che il ferro puro fonde a 1540 °C. Da questi forni quindi, dopo molte ore di riscaldamento, si otteneva non del metallo fuso ma una miscela solida spugnosa, dall'aspetto poco invitante per un metallurgo abituato fino ad allora a raccogliere sul fondo del forno, alla fine del processo fusorio, un bel pezzo di rame quasi puro.

Questa massa spugnosa, detta "**blumo**" o anche "**massello**", era costituita da ferro, da un parte di carburo di ferro (Fe₃C), pezzetti di carbone e altre impurezze, come residui di ossido di ferro non ridotto e composti del silicio (silicati) che costituivano la scoria.

Figura 2. La struttura spugnosa del ferro in masselli è evidente in questa microfotografia elettronica a 2400 ingrandimenti che si riferisce a un campione di ferro dei nostri giorni ottenuto a una temperatura inferiore al suo punto di fusione. Una tale struttura spugnosa è stata ottenuta riducendo dell'ossido di ferro molto puro in atmosfera di elio e ossido di carbonio. Se per la preparazione del campione si fosse utilizzato minerale di ferro ordinario, gli interstizi della struttura spugnosa sarebbero stati riempiti da scoria, eliminabile solo dopo successiva martellatura.



Il processo chimico che avveniva nel forno era nella sostanza una "riduzione". Utilizzando l'ematite come minerale di partenza, le reazioni chimiche coinvolte si possono così rappresentare:



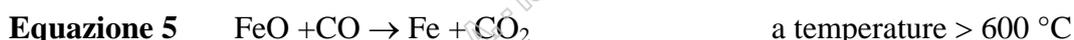
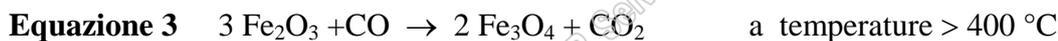
Questa reazione rappresentava il "motore termico" del bassofuoco in quanto il carbone, bruciando, sviluppava tutto il calore necessario per il processo complessivo di riduzione. Si dice che questa è una reazione fortemente esotermica.

Ad alta temperatura e in presenza di un eccesso di carbonio (cioè carbone) l'anidride carbonica poteva reagire secondo la seguente reazione:



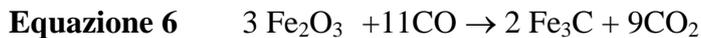
L'ossido di carbonio formatosi è un gas fortemente riducente, come il carbonio, ma più efficiente di esso. L'ossido di carbonio è infatti un gas mentre il carbonio è solido: poiché le reazioni successive prevedono la combinazione con gli ossidi di ferro solidi è evidente che una reazione gas-solido è nettamente più veloce di una reazione solido-solido.

Le reazioni successive comportavano l'attacco del CO sull'ematite¹, attacco che avveniva in più passaggi, qui rappresentati:



Nei punti più caldi della fornace primitiva erano anche possibili reazioni che portavano alla formazione del **carburo di ferro**, comunemente noto come **cementite** Fe₃C, un composto particolarmente fragile che doveva poi essere eliminato:

¹ Nelle zone in cui la temperatura superava i 1000 °C erano anche possibili le reazioni dirette con il carbonio ed il minerale di ferro.



In conclusione dal processo di riduzione nel bassofuoco si otteneva un blumo poroso, che oltre alle impurità sopra ricordate, conteneva un miscuglio di ferro puro e di carburo di ferro Fe_3C , composto particolarmente ricco di carbonio (6,7% in peso).

Questa nostra particolare attenzione al contenuto di carbonio nel blumo è dovuta al fatto che la sua presenza, come già detto in precedenza, modifica in maniera eclatante le proprietà del metallo di base, il ferro.

Il problema fondamentale che avevano gli antichi fabbri era duplice: quello di decarburare adeguatamente il blumo ottenuto, cioè di abbassare e di omogeneizzare il contenuto di carbonio e di eliminare nel contempo tutte le impurezze che vi erano rimaste incluse.

La principale di queste era sicuramente la scoria. Se nel processo di fusione non era stato utilizzato un adeguato fondente (cosa sicuramente probabile nei processi più antichi) essa derivava dalla reazione, ad alta temperatura, tra l'ossido ferroso FeO e la ganga silicea:



Tale composto, noto come fayalite, doveva essere letteralmente "spremuta" fuori dal blumo, sfruttando il fatto che essa diventava viscosa a partire dalla temperatura di 1177°C . A questo scopo il fabbro scaldava nuovamente il blumo a circa 1200°C con un fuoco di carbone di legna su di una **forgia** e quindi martellava il blumo all'incudine. Appena il blumo tendeva a raffreddarsi, al di sotto di 800°C , esso veniva nuovamente riscaldato sulla forgia, e così via.

Con questo ciclo, ripetuto a volte migliaia di volte, si trasformava il blumo di ferro poroso in un materiale più compatto e uniforme ma soprattutto si omogeneizzava e si diminuiva progressivamente la quantità di carbonio nel ferro.

Alle alte temperature della fucina sulla superficie del ferro riscaldato, per reazione con l'ossigeno atmosferico, si formavano delle incrostazioni di ossidi, soprattutto di FeO ;



Per aumentare la formazione di questo ossido, i fabbri antichi astutamente spianavano il materiale dopo averlo riscaldato, in modo di aumentare la superficie esposta all'aria; quando la superficie si era ricoperta di ossido scuro, cosa che si verificava a occhio, i fabbri ripiegavano la lastra come una pasta sfoglia, sempre a caldo, e con ciò incorporavano l'ossido nella massa.

Nella massa calda avveniva quindi la seguente reazione:



Il risultato di questa laboriosa lavorazione era che il carburo di ferro veniva progressivamente eliminato, decarburando quindi il materiale.

Il ferro così ottenuto era quasi puro, pur con una piccola percentuale di silicio, e con tracce di sostanze vetrose (in pratica residui di scoria non completamente eliminata), che tuttavia alla fine miglioravano la qualità del prodotto, in particolare in termini di resistenza alla corrosione.

Alla fine di tutte queste operazioni si otteneva il ferro battuto o ferro saldato, che poi i fabbri ferrai potevano successivamente modellare, per la produzione dei vari manufatti.

Tutta questa immane fatica tuttavia non era affatto ben ricompensata, in quanto il ferro battuto era un materiale che non poteva in pratica rivaleggiare con il bronzo.

Il ferro ottenuto dal blumo era infatti un materiale troppo tenero e con una resistenza di circa 28 kg/mm^2 , che solo di poco superava quella del rame ($20\text{-}25 \text{ kg/mm}^2$).

È ben vero che **incrudendo** il ferro, mediante **martellatura a freddo**, si poteva aumentare la sua resistenza a circa $60\text{-}70 \text{ kg/mm}^2$. Tuttavia un getto di bronzo contenente l'11% di stagno presentava

una resistenza iniziale di $40\div 45 \text{ kg/mm}^2$, che poteva essere elevata a $80\div 85 \text{ kg/mm}^2$ con il martellamento a freddo.

Di conseguenza per le armi e per gli utensili il bronzo appariva decisamente più adatto.

Inoltre il bronzo aveva altre caratteristiche decisamente superiori a quelle del ferro battuto primitivo: con le temperature raggiungibili nei forni antichi (attorno ai $1000\text{-}1200 \text{ }^\circ\text{C}$) esso poteva facilmente fondere e bastava poi colare la massa liquida in opportuni stampi per ottenere gli oggetti e gli utensili della forma voluta, senza grande fatica.

In quest'arte gli antichi metallurghi del bronzo seppero raggiungere una fantastica maestria.

Il ferro invece non poteva essere direttamente fuso a causa della sua elevata temperatura di fusione e la sua lavorazione richiedeva il lungo e faticoso lavoro di forgiatura, con consumo notevole di combustibile e un gravoso lavoro per il fabbro, costretto a lavorare d'incudine e martello. Senza poi contare altri notevoli vantaggi del bronzo sul ferro: la sua resistenza all'azione corrosiva degli agenti atmosferici (mentre il ferro, se non ha alcuna protezione, come è noto, arrugginisce) e il suo colore che lo rendevano e lo rendono un metallo assai decorativo. Infatti nell'architettura e nei monumenti, i romani per esempio preferirono sempre al ferro il bronzo, che utilizzarono anche per scopi meno "nobili", ad es. per legare fra loro i blocchi di pietra del Colosseo.

Per le ragioni su esposte, il bronzo rimase per oltre due millenni il materiale più importante per fare armi, utensili e articoli di ogni genere. La sua bassa temperatura di fusione, la sua resistenza alla corrosione, il suo bel colore e la sua resistenza meccanica, rendevano il bronzo di gran lunga superiore al tipo di ferro che allora si poteva produrre. Così è stato fin quasi alla fine del II millennio a.C. quando nel giro di alcuni secoli il ferro prese decisamente il sopravvento sul bronzo, almeno per la fabbricazione delle armi e in genere di tutti quegli oggetti che dovevano essere resistenti e duri il più possibile. Verso il 1200 a.C. inizia così quella che si chiamerà l'età del ferro.

Cosa abbia spinto i metallurghi a impiegare tempo ed energie verso il ferro, quando il bronzo forniva già una risposta pienamente soddisfacente alle esigenze delle comunità, costituisce un rilevante problema storico.

Intorno alla metà del XIV secolo a.C. e nei secoli immediatamente successivi la lavorazione del bronzo raggiunse in Europa una diffusione e una perizia tecnica mai osservate nel passato, compiendo un netto balzo qualitativo e quantitativo rispetto ai periodi precedenti. Nei ripostigli della tarda età del bronzo si riscontra una ricca produzione di pressoché tutti i manufatti necessari alla vita quotidiana, quali strumenti, armi, ornamenti, vasellame. Alcuni oggetti, come asce e scalpelli, si specializzano e si diversificano a seconda delle funzioni che sono destinati ad assolvere. Entrano nell'uso forme di fusione multiple, che consentono la produzione di più oggetti, e la tecnica della cera persa, che permette, tra l'altro, di tradurre in metallo elaborate creazioni artistiche. Si riscontra anche una crescente consapevolezza nella realizzazione delle leghe.

Può apparire quindi bizzarro come, proprio mentre le leghe di rame sviluppano appieno le loro potenzialità, venga sperimentata con fatica una tecnologia del tutto differente, quella del ferro, per molti versi più complessa e destinata a fornire a lungo prodotti qualitativamente meno soddisfacenti.

Una risposta può venire osservando la complessa situazione storica che caratterizza il bacino del Mediterraneo nella tarda età del bronzo, tenendo conto, nel frattempo, della dislocazione dei giacimenti di minerali necessari per ottenere il ferro e il bronzo, che rappresentavano per l'epoca vere e proprie materie prime a carattere strategico.

Mentre i minerali ferrosi sono diffusi abbondantemente sulla crosta terrestre, tanto da potersi considerare praticamente ubiquitari, altrettanto non si può dire dei componenti del bronzo, il rame e, soprattutto, lo stagno. Quest'ultimo è infatti localizzato unicamente in poche regioni del mondo antico e ciò lo rendeva particolarmente raro e prezioso. Giacché i ricchi imperi mediorientali erano pressoché privi, nel loro territorio, di giacimenti idonei a soddisfarne la crescente richiesta, essi erano del tutto dipendenti dalle importazioni che li raggiungevano mediante lunghi e pericolosi traffici sia terrestri che marittimi.

Questa articolata e delicata rete di scambi commerciali sembra entrare in crisi negli ultimi secoli del II millennio a.C., quando l'area del bacino orientale del Mediterraneo viene sconvolta da una crisi profonda.

In questo confuso quadro di instabilità economica e politica si può agevolmente supporre che non fosse più possibile garantire il regolare afflusso di materie prime, in particolare di rame e stagno, che dall'Occidente dovevano in precedenza raggiungere i paesi vicino-orientali.

Per soddisfare le esigenze di metallo dovettero quindi, verosimilmente, incrementarsi le sperimentazioni relative al ferro, la cui tecnologia di base era nota da oltre un millennio, ma che non era mai stata sviluppata appieno per la concorrenza del bronzo.

La crisi politica di cui sopra ha probabilmente avuto anche un effetto "liberista" sulla produzione dei metalli. Va infatti tenuto presente che fino ad allora la loro lavorazione, in quanto ricchezza strategica, era stata sottoposta al potere politico; in particolare era controllata la circolazione del ferro, tanto che in Assiria ne era vietata l'esportazione. È possibile quindi che la crisi abbia allentato i controlli centrali, permettendo ai fabbri maggiore libertà di movimento, con scambi di eventuali «segreti di bottega» che avrebbero facilitato e accelerato lo sviluppo tecnologico.

Queste osservazioni devono essere particolarmente valide per l'impero ittita, che fino ad allora aveva posseduto in pratica il monopolio della produzione del ferro, controllando rigorosamente le attività dei suoi fabbri, in particolare quelli delle tribù dei Calibei, un popolo ad essi sottomesso, abitante nell'Armenia e nelle regioni nord-orientali del Mar Nero. I fabbri calibei erano i migliori del mondo antico e con la caduta dell'impero ittita furono cacciati dai popoli invasori lontani dalle loro terre.

Ciò permise di diffondere in breve tempo le loro conoscenze sia nel bacino del Mediterraneo che, più tardi, nell'Europa centrale: la fine di antichi imperi aveva causato la chiusura di un'epoca, l'età del bronzo ma aveva permesso l'avvento dell'età del ferro.

Una giornata di lavoro di un fabbro ferraio

Come si è già accennato la produzione del massello di ferro saldato non concludeva il lavoro del fabbro, in quanto a questo punto il materiale doveva essere conformato per ottenere il manufatto definitivo, arma o utensile che fosse.

Naturalmente questa parte finale del lavoro poteva essere fatta anche dopo un certo tempo, dallo stesso fabbro che aveva ottenuto il ferro dal minerale o da un altro fabbro della tribù, magari più esperto nella produzione di manufatti. Alternativamente il ferro poteva (o forse doveva) essere ceduto come tributo agli emissari imperiali, che per conto del governo centrale si interessavano poi a commercializzarlo a caro prezzo.

Quando il fabbro doveva lavorare il ferro gli si presentava da subito un dilemma: il ferro, anche se molto puro, non era certo malleabile come il rame. La sua deformabilità a freddo era molto modesta, tale da non consentire la sua lavorazione per martellamento a freddo e successiva ricottura che era la lavorazione tipica del rame.

Avrebbe allora potuto tentare la via fusoria, caratteristica della lavorazione del bronzo ma i 1537°C, temperatura a cui fonde il ferro puro, rappresentavano una meta irraggiungibile per la tecnologia di allora (e anche di molti secoli a venire....).

Rimaneva allora una sola possibilità: la fucinazione a caldo del ferro, mediante l'uso della forgia, della mazza e dell'incudine, sfruttando il fatto che il ferro diventava sufficientemente malleabile ad alte temperature. L'intervallo di temperatura per utilizzare al meglio questa pastosità a caldo del ferro era compreso tra gli 800 e 1200 °C, risultando inadatte sia temperature più basse che più elevate².

Questi manufatti finali in ferro dolce continuavano comunque a possedere proprietà meccaniche modeste, come abbiamo già ricordato, a confronto con quelli di bronzo. La situazione cambiò radicalmente con la scoperta dell'**acciaiatura**. Essa fu sicuramente la tecnica più importante tra

² Temperature inferiori a 800 °C causano una scarsa plasticità del ferro, con conseguente incrudimento e comparsa di fragilità mentre valori di temperatura superiori a 1200 °C causano un'eccessiva ossidazione del pezzo in lavorazione.

quelle che portarono a migliorare le caratteristiche del ferro battuto. Risale a circa la metà del II millennio a.C. e, come spesso succede per molte delle scoperte che hanno segnato la storia dell'umanità, fu probabilmente il frutto del caso. Un giorno, un fabbro ferraro, forse dei calibei, dovette dimenticarsi tra i carboni ardenti di una forgia un'arma o un oggetto di ferro battuto in via di lavorazione. Dopo molte ore, recuperato l'oggetto, egli si accorse che il ferro era diventato molto più duro e resistente del materiale di partenza. Oggi sappiamo che ciò dipendeva dal fatto che un certo quantitativo di carbonio che veniva dal carbone di legna penetrava e si fissava negli strati superficiali del metallo: in pratica questi strati superficiali dell'oggetto venivano in qualche modo carburati, cioè venivano trasformati da ferro in acciaio.

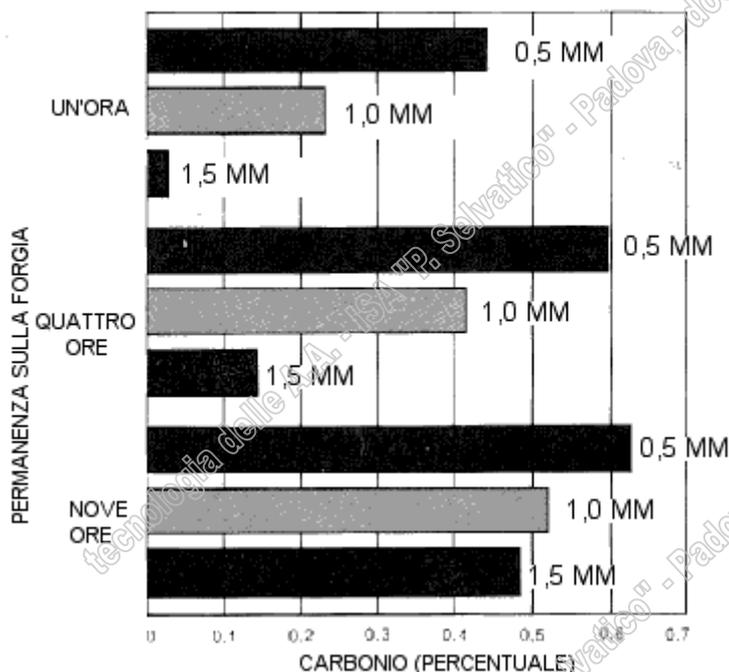


Figura 3. La cementazione del ferro si ottiene con la diffusione del carbonio, proveniente da un fuoco di carbone di legna, entro il ferro. L'entità della diffusione dipende dalla *temperatura* e dal *tempo* di permanenza del ferro sulla forgia. Alla temperatura di 950 gradi centigradi la quantità di carbonio diffuso alla profondità di mezzo millimetro dalla superficie del ferro in un'ora è quasi lo 0,5 % in peso ma solo lo 0,02 per cento del carbonio è penetrato a una profondità di 1,5 millimetri. Come si vede dal grafico, l'esposizione prolungata aumenta la percentuale del carbonio diffuso alla profondità di un millimetro e di 1,5 millimetri dalla superficie mentre non provoca aumenti significativi nella percentuale.

Questo processo di carburazione, detto **'cementazione'**, era nella sostanza un

processo a ritroso rispetto alla precedente lavorazione del blumo. Prima si era tolto carbonio, ora lo si aggiungeva (ma non troppo)³. Per un po' probabilmente questo processo di acciaiatura rimase casuale, ma col tempo gli antichi metallurghi capirono come controllarlo.

Sicuramente verso l'inizio del I millennio a.C. i fabbri ferrari all'avanguardia sapevano padroneggiare piuttosto bene questa tecnica dalla quale i prodotti in ferro trassero vantaggi enormi. Infatti, aggiungendo carbonio nell'ordine dell'1% il ferro arrivava a una resistenza di 70-80 kg/mm² (come il bronzo martellato), ma questo valore poteva salire anche sopra i 150 kg/mm² col martellamento a freddo. Il ferro così ottenuto (che in realtà in superficie era acciaio) aveva finalmente caratteristiche nettamente superiori a quelle del rame e del bronzo e risultava essere più idoneo per la produzione di manufatti che richiedevano alta resistenza meccanica e durezza.

La scoperta casuale della cementazione deve avere incoraggiato la sperimentazione e nel corso del tempo gli antichi fabbri calibei poterono controllare il processo in modo da impartire al metallo le caratteristiche più adatte all'uso cui era destinato.

Il processo di acciaiatura rimase probabilmente monopolio dei calibei (e quindi degli Ittiti) dal 1400 al 1200 a.C., per poi diffondersi, con la caduta dell'impero ittita, in tutto il Medio Oriente e nelle isole greche raggiungendo poi l'Italia e l'Europa centrale.

Col tempo poi si imparò a carburare anche una sola parte di un manufatto, lasciando inalterato il resto dell'oggetto. Questa cementazione differenziale poteva essere effettuata spalmando quelle

³ Tale metodica, con qualche variante, viene ancora oggi utilizzata per rendere particolarmente dure e resistenti all'usura le superfici di certi acciai speciali per ingranaggi, ruote dentate, mozzi, perni.

parti dell'oggetto finito destinate ad avere maggiore durezza, come la lama, con un impasto — il «cemento» — costituito da sostanze carboniose (miscele di carbone, olii e residui organici, quali ossa, corno, cuoio, ecc.) e collocando il pezzo in un vaso, dove veniva ricoperto con terra inerte e sabbia. Il vaso, sigillato, era posto nella fornace ad una temperatura intorno ai 900 °C (il «calor rosso») e lì lasciato per il tempo necessario al compiersi del processo di trasferimento del carbonio dal cemento alla superficie del manufatto.

Nel corso dei secoli queste ricette segrete videro l'introduzione di sostanze sempre più misteriose, la cui presenza non sempre è facile da spiegare in termini scientifici, semplicemente perché la lavorazione del ferro (ma più in generale la metallurgia) risentì moltissimo di credenze magiche e religiose, tanto che, presso molti popoli, i fabbri erano considerati come una specie di stregoni.

Concludiamo queste riflessioni sottolineando come i processi di acciaiatura ora considerati siano e rimangano processi superficiali, per cui la trasformazione del ferro dolce in acciaio avviene sulla superficie più esterna del manufatto, mentre il "cuore" dell'oggetto, specie se di notevole spessore, rimane di ferro puro. Nel caso di manufatti di spessore limitato, come le lame di coltelli e di spade, in cui il carbonio può diffondere nel corso del processo di carburazione anche nelle parti più profonde, è sempre possibile verificare una variazione (gradiente) del contenuto di carbonio, tra le parti esterne e quelle interne.

La tempra dell'acciaio

*«Come un fabbro una gran scure o un'ascia
nell'acqua fredda immerge, con sibilo acuto,
temprandola: e questa è appunto la forza del ferro;
così strideva l'occhio del mostro
intorno al palo d'olivo»
Omero - Odissea - Libro IX*

In questo passo dell'Odissea viene "fotografato" un altro processo che migliora in maniera significativa le qualità del ferro cementato. Attenzione! Non del ferro puro, quello, per intenderci, ottenuto direttamente dal blumo ma quello già sottoposto a carburazione, trasformato cioè in acciaio, almeno in superficie. Si tratta del processo di tempra, detta anche tempera, che consiste nel raffreddamento rapido di un pezzo di metallo arroventato mediante immersione in acqua.

Dal punto di vista fisico questo processo consiste nel "fissare" (o, se preferite, nel "congelare") la microstruttura che l'acciaio presenta ad alta temperatura, sopra la soglia dei 727 °C⁴, attraverso un raffreddamento rapido che non consenta alla struttura di cambiare, cosa che invece avverrebbe con un normale lento raffreddamento all'aria.

In questo modo si ottiene un materiale più duro, anche se più fragile; quindi adatto per utensili che richiedano una particolare durezza.

Non è noto come, dove e quando sia avvenuta questa scoperta anche se non è difficile immaginare che ancora una volta dovremmo invocare il caso, coniugato all'acuta capacità di osservazione di un fabbro. Forse l'urgenza di dover afferrare subito con le mani un oggetto ancora rovente, forse la necessità di non avere troppi pezzi roventi intorno al fabbro, magari in una fucina angusta e povera di spazio, può aver suggerito l'idea di immergere in acqua un manufatto rovente in ferro acciaiato. È certo che nelle terre che si affacciano sul Mediterraneo orientale il processo di tempra era ben noto fin dall'VIII - VII secolo a.C. Sicuramente l'acqua si prestava bene per questo processo di raffreddamento ma ben presto si tentò l'uso di altri mezzi di refrigerazione, quali l'urina ed altri liquidi di origine biologica⁵.

⁴ Per i fabbri di allora, sopra la soglia del "rosso ciliegia nascente".

⁵ In uno Scritto di Teofilo Presbyter (XI sec. d.C.), si legge: «Si può temprare il ferro anche in quest'altro modo, quello stesso che si adopera per tagliare il vetro e le pietre più tenere. Prendi un capro nero di tre anni e legalo per tre giorni in qualche luogo coperto e senza cibo; il quarto giorno dagli da mangiare delle felci e nient'altro. Dopo averlo così nutrito per due giorni, la terza notte rinchiudilo in un fusto dal fondo forato sotto il quale metterai un altro recipiente sano in cui raccoglierai la sua urina. Dopo averne raccolta così abbastanza per due o tre notti, libera

Sembra che questa pratica, al di là di implicazioni di carattere magico, si dimostrasse incredibilmente utile per due ragioni. La prima è che il raffreddamento era più rapido. Quando si versa dell'acqua su un metallo caldo, si forma un sottile strato di vapore, cosicché l'acqua non tocca in effetti il metallo e si ha una cattiva conduzione del calore. Questo si può dimostrare facilmente facendo sgocciolare un po' d'acqua su un ferro da stiro caldo. Con l'urina però, man mano che l'acqua evaporava si formavano dei cristalli sulla superficie del metallo, che agivano da collegamento attraverso lo strato di vapore e miglioravano la conduzione di calore. Inoltre l'urina fermentata contiene urea e ammoniaca che sono entrambe composti dell'azoto.

Sulla superficie del metallo poteva quindi avvenire anche una parziale **nitrurazione** del ferro: si formavano così dei cristalli aghiformi di nitruro di ferro Fe_2N che indurivano ulteriormente il metallo temprato⁶. In realtà la nitrurazione che aveva luogo durante il raffreddamento doveva essere di entità molto ridotta. Infatti con il metodo industriale moderno, affinché avvenga la nitrurazione dell'acciaio è necessario immergere il ferro per due o tre giorni, in urea o in ammoniaca, il che rappresenta un trattamento abbastanza costoso, adoperato solo quando si vuole una qualità elevata⁷.

Questo tipo di tempra, detta tempra forte, oltre a produrre l'indurimento dell'acciaio sviluppava tuttavia nel materiale trattato una qualità sicuramente indesiderata: la fragilità, cioè l'incapacità di resistere agli urti violenti. Infatti, a causa della severità del raffreddamento in acqua, che risultava molto rapido, potevano generarsi delle forti tensioni intercrystalline che dovevano essere eliminate o ridotte il più possibile onde impedire la formazione di cricche, dette appunto cricature di tempra.

Una valida alternativa all'acqua, come mezzo di refrigerazione, poteva essere costituito da vari tipi di olii, che causavano un raffreddamento più graduale: in termini moderni si sarebbe parlato di tempra dolce. Anche in questo procedimento gli antichi fabbri si sbizzarrirono nella ricerca delle sostanze più idonee. Sentite cosa proponeva a questo proposito un manuale, dal titolo «De coloribus et artibus Romanorum»⁸ scritto da un certo Eraclio vissuto probabilmente nell'VIII secolo d.C.

La tempra del ferro.

Chiunque voglia incidere le pietre preziose con ferro duro, osservi queste regole, per temprarne la punta. Nel periodo in cui il capro arde d'amore più del solito, il suo grasso⁹ da solo è più adatto a questo scopo. Se in tal grasso uno spegne il ferro rovente, questo subito s'indurisce con solida punta.

Anche un raffreddamento meno brusco non impediva comunque la comparsa di una certa fragilità che per essere dominata richiedeva un ulteriore trattamento termico conclusivo, entrato in uso probabilmente tra il V - IV secolo a.C. e perfezionato poi dai romani: il **rinvenimento**.

Il rinvenimento

Il pezzo già temprato veniva sottoposto a rinvenimento che consisteva nel riscaldare nuovamente l'oggetto a una temperatura variabile tra i 200 e i 400 °C per poi raffreddarlo, in genere all'aria. Così facendo effettivamente si diminuiva un poco la durezza dell'acciaio che però risultava nettamente meno fragile e più idoneo a quegli usi in cui era importante resistere agli urti. In ogni caso era indispensabile evitare il superamento dei fatidici 727 °C, pena la perdita della durezza impartita dalla tempra. Ancora una volta la mancanza dei termometri era sopperita dall'osservazione: per essere certi di non superare la predetta soglia bastava smettere il riscaldamento dell'acciaio temprato prima che esso diventasse incandescente, acquisisse cioè la capacità di emettere luce, fenomeno che si verifica a temperature attorno ai 600°C. Detta così la faccenda poteva sembrare banale, ma un

il caprone e tempra i tuoi utensili nella sua urina. Gli utensili di ferro possono anche essere temprati nell'urina di un ragazzo dai capelli rossi e si induriscono di più che in semplice acqua. Perché i capelli dovessero essere rossi per me rimane un bel mistero!

⁶ La nitrurazione è un processo a più tappe: il primo nitruro che si forma quello a minor contenuto di azoto Fe_4N , all'aumentare del tenore di azoto assorbito si forma il nitruro Fe_2N .

⁷ Naturalmente il ferro deve essere caldo affinché l'azoto possa penetrare nel metallo. I cani normalmente non induriscono i pali dei lampioni.

⁸ Tratto dal libro I°, capitolo XII.

⁹ In fin dei conti il grasso di un caprone e l'olio di oliva non sono poi così diversi, visto che si tratta in ogni caso di trigliceridi.

buon rinvenimento non era dopo tutto così facile da ottenere: più la temperatura di rinvenimento era elevata più marcata era la diminuzione della durezza; inoltre anche il tempo di permanenza dell'acciaio alla temperatura di rinvenimento e la velocità del successivo raffreddamento influenzavano il risultato finale. Tuttavia l'assenza di emissione luminosa da parte dell'acciaio nell'intervallo di temperatura più adatto al rinvenimento rappresentava un problema per la conseguente mancanza di parametri idonei a definire la temperatura di rinvenimento dell'oggetto riscaldato¹⁰. Ancora una volta l'acuto senso di osservazione di qualche fabbro ferraio trovò il modo di risolvere il dilemma! Un giorno qualcuno si accorse che durante il riscaldamento, sulla superficie dell'acciaio, comparivano dei colori, colori che cambiavano man mano che la temperatura saliva¹¹. Erano le cosiddette tinte di rinvenimento, un nuovo "termometro" per definire, con discreta precisione, i vari valori di temperatura, anche per l'intervallo considerato.

Tabella 1: TINTE DI RINVENIMENTO

Colore superficiale	temperatura	Colore superficiale	temperatura
Giallo paglia	220 °C	blu	295 °C
Giallo oro	235 °C	azzurro	310 °C
Giallo scuro	250 °C	Grigio verde	325 °C
Rosso porpora	270 °C	Grigio azzurro	335 °C
violetto	285 °C	grigio	400 °C

Conclusione

Riassumendo, fra il 1400 e il 400 a.C., in quella che viene chiamata la prima età del ferro, vennero scoperte le tre tecniche fondamentali di **acciaiatura** (o carburazione o cementazione), di **tempra** e di **rinvenimento**. Queste tre operazioni, combinate fra loro, permisero di migliorare enormemente la qualità delle leghe del ferro. Gli antichi fabbri ferraia una volta scoperte, probabilmente per caso, queste tecniche, riuscirono a padroneggiarle perfettamente, facendo tesoro della loro esperienza e di quella dei loro predecessori. D'altra parte per secoli, possiamo dire fino all'inizio del secolo scorso (quando la scienza diventò uno degli elementi fondamentali dello sviluppo tecnologico) la metallurgia del ferro si sviluppò unicamente sulla base della esperienza.

L'avvento dell'età del ferro comportò anche una importante rivoluzione tecnologica nella metallurgia.

Mentre per il **bronzo** l'aspetto fondamentale per definirne le **proprietà** è la **composizione della lega** (cioè le percentuali relative di rame e stagno presenti), per il **ferro** (e l'**acciaio**) le **caratteristiche fondamentali** dipendono assai più dalla sua **lavorazione**; in altre parole possiamo dire che il ferro mantiene memoria dei cicli di lavorazione attraverso cui è passato.

È quindi la maestria del fabbro che determina in massima parte le caratteristiche di un manufatto siderurgico.

¹⁰ Non sarebbe stata una buona idea chiedere al garzone di bottega di afferrare tra le mani il pezzo in via di riscaldamento, affinché stabilisse, al tatto, se la temperatura fosse di 250 o di 300 °C!

¹¹ Oggi noi sappiamo che questi diversi colori sono da attribuirsi ai vari tipi di **ossido** che possono formare sulla superficie metallica riscaldata.