

A09

Nicola Saredo Parodi

La millenaria avventura del ferro
Il materiale che ha forgiato la nostra civiltà





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXXI
Giacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.giacchinoonoratieditore.it
info@giacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-3998-1

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: marzo 2021

Indice

- 11 *Ringraziamenti*
- 13 *Premessa*
- 15 *Un antefatto remoto*
- 21 *Introduzione*
- 23 *Capitolo I*
Caratteristiche dei metalli
- 29 *Capitolo II*
Caratteristiche del ferro e sue leghe
- 33 *Capitolo III*
Caratteristiche dei combustibili
- 35 *Capitolo IV*
Breve storia dei combustibili per la produzione di ferro
- 39 *Capitolo V*
Rivoluzione, invenzione e innovazione
- 41 *Capitolo VI*
Diffusione delle invenzioni e segreti industriali
- 45 *Capitolo VII*
I primi metalli
- 49 *Capitolo VIII*
La riduzione dei minerali
- 53 *Capitolo IX*
Il bronzo

6	<i>Indice</i>
55	Capitolo X <i>Il ferro meteoritico</i>
57	Capitolo XI <i>I primordi della produzione del ferro</i>
59	Capitolo XII <i>La riduzione dei minerali ferrosi</i>
61	Capitolo XIII <i>L'inizio dell'età del ferro e il metodo diretto</i>
67	Capitolo XIV <i>Dove nasce il primo ferro da riduzione?</i>
69	Capitolo XV <i>Il primo ferro in Medioriente</i>
71	Capitolo XVI <i>Il primo ferro in Cina</i>
75	Capitolo XVII <i>Altri poli siderurgici indipendenti?</i>
79	Capitolo XVIII <i>Diffusione della siderurgia fuori dal Medioriente</i>
81	Capitolo XIX <i>Nascita e sviluppo della siderurgia in Etruria</i>
91	Capitolo XX <i>Tipologie di forni e loro funzionamento</i> 20.1. Fonti archeologiche, 91 – 20.2. Fonti letterarie, 95.
105	Capitolo XXI <i>Conclusioni sul ferro in Etruria</i>

- 107 Capitolo XXII
La lavorazione del ferro nel Medioevo in Europa
- 111 Capitolo XXIII
La spada
- 113 Capitolo XXIV
Il metodo indiretto per la produzione del ferro
- 115 Capitolo XXV
I vantaggi del metodo indiretto
- 117 Capitolo XXVI
Lo sfruttamento dell'energia idraulica
- 123 Capitolo XXVII
La nascita del metodo indiretto in Europa
- 127 Capitolo XXVIII
Contatti Est-Ovest
- 135 Capitolo XXIX
Dove nasce il metodo indiretto in Europa
- 141 Capitolo XXX
Periodo di transizione
- 143 Capitolo XXXI
La siderurgia europea nei secoli XIV e XV
- 145 Capitolo XXXII
Le armi da fuoco in Europa nei secoli XIV e XV
- 149 Capitolo XXXIII
I primi trattati di metallurgia
33.1. De la pirotechnia di Vannoccio Biringuccio, 150 – 33.2. De Re Metallica di Georg Agricola, 156.

- 163 Capitolo XXXIV
L'Europa prima della rivoluzione industriale (secolo XVI e XVII)
- 169 Capitolo XXXV
La rivoluzione industriale in Inghilterra
- 173 Capitolo XXXVI
Progressi della siderurgia durante la rivoluzione industriale (secolo XVIII e XIX)
- 185 Capitolo XXXVII
Gli sviluppi della siderurgia nel XX secolo
- 191 Capitolo XXXVIII
Un ritorno al passato?
- 195 Capitolo XXXIX
Uno sguardo al futuro
- 199 Capitolo XL
Conclusioni

APPENDICI

Appendice 1. La chimica del ferro, 201 – Appendice 2. Caratteristiche del ferro, 205 – Appendice 3. Diagramma di stato Ferro-Carbonio, 207 – Appendice 4. Metodo diretto e indiretto, 211 – Appendice 5. Proprietà dei combustibili, 215 – Appendice 6. Temperatura del forno e composizione scorie, 217 – Appendice 7. Primi reperti in ferro, 219 – Appendice 8. Materiali refrattari per i forni del ferro, 221.

223 *Bibliografia*

Indice illustrazioni

Figura 1. Supernova, 18 – Figura 1.2. Diagramma sforzo-deformazione di un metallo, 25 – Figura 4.1. Carbonaia, 37 – Figura 8.1. Efesto, 52 – Figura 10.1. Pezzi di un meteorite (Windhoek, Namibia), 56 – Figura 19.1. Carta dell'Etruria mineraria, 82 – Figura 19.2. Ricostruzione di forni etruschi a Populonia, 88 – Figura 20.1. Rappresentazione di forno egizio, 91 – Figura 20.2. Rappresentazione di forno di riduzione su vaso, 93 – Figura 20.3. Forno a tino sperimentale moderno, 94 – Figura 26.1. Schema di tromba idro-eolica, 118 – Figura 28.1. I principali percorsi della Via della

Seta, 131 – Figura 33.1. Esempio di basso fuoco alimentato da un doppio mantice (da V. Biringuccio), 153 – Figura 33.2. Esempio di forno a manica (da V. Biringuccio), 153 – Figura 33.3. Esempio di forno per ferro (da G. Agricola), 158 – Figura 36.1. Ponte Ironbridge a Coalbrookdale (1779), 176 – Figura 36.2. Forno a puddellare, 177 – Figura 36.3. Convertitore Bessemer, 180 – Figura 36.4. Forno Martin Siemens, 182 – Figura 36.5. Tour Eiffel, 182 – Figura 37.1. Esempio di moderno altoforno, 186 – Figura 37.2. Schema di un forno elettrico, 187 – Figura 37.3. Complesso siderurgico a ciclo integrale a Ijmuiden (NL).

Indice tabelle

Tabella 1.1. Energia libera di formazione, 24 – Tabella 1.2. Punto di rottura dei metalli più comuni, 26 – Tabella 1.3. – Durezza Mohs dei metalli più comuni, 27 – Tabella 26.1. Cronologia delle applicazioni del mulino (secondo Lucas), 120 – Tabella 36.1. Andamento produzione acciaio, 180 – Tabella 37.1. Evoluzione delle dimensioni altoforni, 185 – Tabella 39.1. Previsione durata principali risorse, 197.

Ringraziamenti

A mia moglie Fiorella, che, con il suo costante atteggiamento negativo e scettico, mi è stata di sprone per completare questo libro.

Alle mie figlie Beatrice e Elena, che, al solo sentir nominare la parola ferro, cercavano di cambiare discorso, così motivandomi nel mio sforzo inutile.

A mio nipote Enea, che, pur non tradendo il minimo interesse per il testo, ha disegnato con gusto e semplicità diverse illustrazioni.

Al Covid-19, che mi ha inaspettatamente regalato tre mesi di isolamento per la stesura finale dell'opera e mi ha incoraggiato con frasi senza senso, come "Andrà tutto bene" e "Ce la faremo".

Grazie

Il bastiancontrario

Premessa

Narrare la storia del ferro dalle origini ai nostri giorni, con le sue innumerevoli varianti geografiche e tecnologiche, è compito quasi proibitivo. Per fare una trattazione esauriente di questa materia occorrerebbe un'opera enciclopedica con il contributo di numerosi specialisti e l'approfondimento di innumerevoli tematiche scientifiche, tecniche e industriali, nonché economiche, politiche e sociali.

Questo libro si prefigge un obiettivo assai più modesto: con un linguaggio semplice ed accessibile ad un vasto pubblico e senza particolari approfondimenti tecnici, vuole raccontare come la tecnologia della produzione del ferro si è evoluta nel corso dei secoli e quanto ha condizionato l'evoluzione della civiltà umana.

Percorreremo passo passo la storia della siderurgia dalle origini ai nostri giorni, spingendoci sia nel passato remoto (quando si è formato il ferro, ancora prima che si formasse il nostro pianeta) che nel lontano futuro (fino a quando sarà disponibile il ferro e cosa faremo quando si esaurirà).

Non seguiremo l'evoluzione della siderurgia in ogni area geografica, ma ci limiteremo a concentrarci sulle aree geografiche nelle quali tale tecnologia (che in realtà è la somma di tante innovazioni grandi e piccole) ha fatto passi in avanti e trascureremo le aree in cui il ferro è stato prodotto con tecnologie "vecchie": cercheremo però di capire perché le innovazioni siano di volta in volta apparse in aree diverse, spostando la leadership tecnologica e produttiva da un paese a un altro, e cercheremo di evidenziare le conseguenze delle principali innovazioni sulla storia dei paesi in cui si sono affermate e sulla vita delle loro popolazioni.

Un'altra limitazione che ci siamo imposti riguarda inoltre la lunghezza della catena produttiva da prendere in considerazione: la catena produttiva completa va dalla miniera fino all'oggetto finito immesso sul mercato, ma è una catena molto lunga e complessa e che, per la diversità degli oggetti prodotti, è costituita da un'infinità di catene e sottocatene. Per non essere

troppo dispersivi ci concentreremo sulle fasi centrali della catena produttiva (dal minerale fino all'acciaio semilavorato), facendo solo qualche cenno alle successive fasi di forgiatura.

Per non essere tacciati di eccessiva superficialità cercheremo invece di approfondire le motivazioni che generano i cambiamenti tecnologici: non solo il come e il quando, ma anche il perché.

Un antefatto remoto

Da dove viene il ferro? Si è formato sulla Terra? Esisteva già quando si è formata la Terra? E dove si è formato? Per tentare una risposta dobbiamo ricorrere all'astrofisica.

La moderna astrofisica ha raggiunto una sufficiente conoscenza dell'universo e delle sue leggi da permetterci di ricostruire con buona precisione quando e come si sono generati i vari elementi chimici (tra cui il ferro) e quando e come si è formato il piccolo pianeta su cui viviamo.

Bisogna subito dire che il ferro e gli altri elementi non si sono formati sulla Terra, ma in una stella, che poi è esplosa disperdendo nello spazio i suoi elementi, che poi si sono raccolti intorno ad un'altra stella (il Sole) coagulandosi nei pianeti del sistema solare.

Ma andiamo per ordine e cominciamo dall'istante iniziale dell'Universo, il Big Bang, verificatosi circa 13,8 miliardi di anni fa. Nell'istante iniziale (tempo = 0) si ha un ammasso puntiforme di materia ad una temperatura e con una densità talmente elevate da superare ogni immaginazione. In queste condizioni iniziali la materia è dotata di una così elevata energia cinetica che vince tutte le energie di legame e quindi è scissa nei suoi componenti elementari: non solo le molecole sono scisse nei loro atomi, ma gli atomi sono scissi in nuclei ed elettroni, i nuclei sono scissi in protoni e neutroni e questi sono scissi nelle particelle elementari (quark): l'energia cinetica (cioè la temperatura) di queste particelle elementari è così elevata che, scontrandosi continuamente tra di loro, non permettono alle forze di attrazione, pur fortissime, di aggregarle in particelle più grosse. Tralasciamo le domande che sorgono subito nella nostra mente: chi ha concentrato tutta la materia in questa palla? Perché? Come? La scienza riesce a ricostruire la vicenda dell'Universo dall'istante del Big Bang, non è possibile trovare nessun indizio su cosa esistesse prima del Big Bang. Già riuscire ad andare indietro nel tempo fino al Big Bang, e non basandosi su leggende più o meno poetiche, ma sulle leggi della fisica, sembra una cosa quasi impossibile, eppure or-

mai la teoria del Big Bang e dell'evoluzione dell'Universo (Fred Hoyle fu il primo a usare questa definizione nel 1949) è accettata da tutti gli scienziati.

Dall'istante del Big Bang (circa 13,8 miliardi di anni fa) inizia l'espansione dell'Universo e inizia il tempo: facciamo scattare il cronometro e vediamo cosa succede. La massa concentratissima di particelle elementari comincia ad espandersi e, di conseguenza, a raffreddarsi.

Dopo un milionesimo di secondo dal Big Bang la temperatura scende a 10.000 miliardi di gradi Kelvin (a queste temperature i gradi Kelvin coincidono con i più familiari gradi Celsius o centigradi) ed avviene la prima trasformazione: l'unificazione dei quark, che si riuniscono in protoni e neutroni finché non esistono più quark liberi.

Dopo 100 secondi la temperatura scende a "soli" 10 miliardi di gradi Kelvin e si ha la seconda trasformazione: la nucleosintesi, cioè protoni e neutroni si riuniscono in nuclei: ma non si formano nuclei di tutti gli elementi oggi noti, bensì solo nuclei di idrogeno (già presenti, in quanto costituiti da 1 singolo protone) e di elio 4 (2 protoni + 2 neutroni) e siamo anche in grado di calcolare la composizione di questa materia (77% idrogeno e 23% elio).

Dopo 300.000 anni cambia ancora tutto: quando la temperatura scende a 3000° Kelvin si ha la ricombinazione, cioè si formano gli atomi di idrogeno ed elio (gli elettroni non sono più liberi ma ruotano intorno ai nuclei): questo passaggio ha anche un'altra conseguenza importantissima, cioè l'universo da questo istante da buio diventa trasparente, quindi i fotoni (particelle elementari portatrici di luce), invece di essere intrappolate in una materia troppo densa, possono ora viaggiare indisturbate senza urtare altre particelle e percorrere tutto l'universo. Ciò significa che con i nostri strumenti (che catturano i fotoni) possiamo vedere indietro nel tempo fino a 300.000 anni dopo il Big Bang.

Ma ancora non c'è traccia di ferro o di altri elementi.

Bisogna aspettare 1 miliardo di anni perché, mentre la temperatura scende a soli 100° Kelvin (cioè -173° C), dalle impercettibili differenze di densità del gas "giovane" (quello formatosi 300.000 anni dopo il Big Bang) si formano le prime galassie: gli atomi, per forza di gravità, si muovono dove una maggiore densità di materia li attira e progressivamente accelerano la loro velocità mano a mano che in certi punti la densità di materia aumenta, corrono gli uni verso gli altri condensandosi in ammassi stellari all'interno dei quali si formano innumerevoli stelle: nelle stelle la crescente forza di gravità provoca un progressivo aumento di densità e di temperatura finché a una

temperatura di 10 milioni di gradi Kelvin avviene la fusione di due nuclei di idrogeno che formano un nucleo di elio e si libera una grande quantità di energia (la stessa che noi riproduciamo artificialmente nella bomba H o bomba all'idrogeno). Questa fusione nucleare (grazie alla quale tutte le stelle "funzionano") procede in tutte le stelle per un periodo lungo miliardi di anni, finchè gran parte dell'idrogeno contenuto nella stella si converte in elio: a questo punto la stella, che si era mantenuta di dimensioni costanti, collassa su se stessa, cioè si contrae, la temperatura aumenta ancora e si raggiungono temperature che consentono la fusione di nuclei di elio per formare nuclei più pesanti (cioè altri elementi chimici) e liberare altra energia. Questo processo di progressiva fusione di nuclei mano a mano più pesanti avviene con liberazione di grandi quantità di energia fino all'ottenimento di nuclei di ferro: per andare oltre al ferro e ottenere gli elementi più pesanti bisogna fornire energia e questo rende sempre più difficile il processo (e infatti gli elementi più pesanti del ferro sono presenti nell'universo in quantità molto più basse). Mentre molte stelle, nella loro evoluzione, arrivano prima o poi a trasformare gli elementi più leggeri in ferro, solo poche stelle in condizioni particolari riescono ad andare oltre il ferro e ottenere gli altri elementi pesanti fino all'uranio.

Elementi leggeri e pesanti

Cosa si intende per elementi più pesanti e più leggeri? Il peso di un elemento (o, meglio, del suo nucleo atomico) è misurato dal **peso atomico**, che è la somma dei protoni e neutroni contenuti nel nucleo. Si va dall'idrogeno (peso atomico 1) all'uranio (peso atomico 238); il ferro ha peso atomico 56.

Una particolare classe di stelle, dopo aver prodotto al loro interno una serie di gusci concentrici di elementi via via più pesanti fino al ferro, è soggetta a una violentissima esplosione stellare (la *Supernova*), che dura poche settimane o mesi e che è capace di generare anche gli elementi più pesanti del ferro e disperde nello spazio il suo contenuto, lasciando un residuo che è una stella di neutroni o un buco nero. Questa nube contenente tutti i 92 elementi (ma in percentuali via via decrescenti oltre il ferro) si condensa se attratta dalla forza gravitazionale di un'altra stella. È così che, dall'esplosione di una *supernova*, intorno a 5 miliardi di anni fa, intorno al Sole si è formato il sistema solare, cioè l'insieme dei pianeti tra cui la Terra.

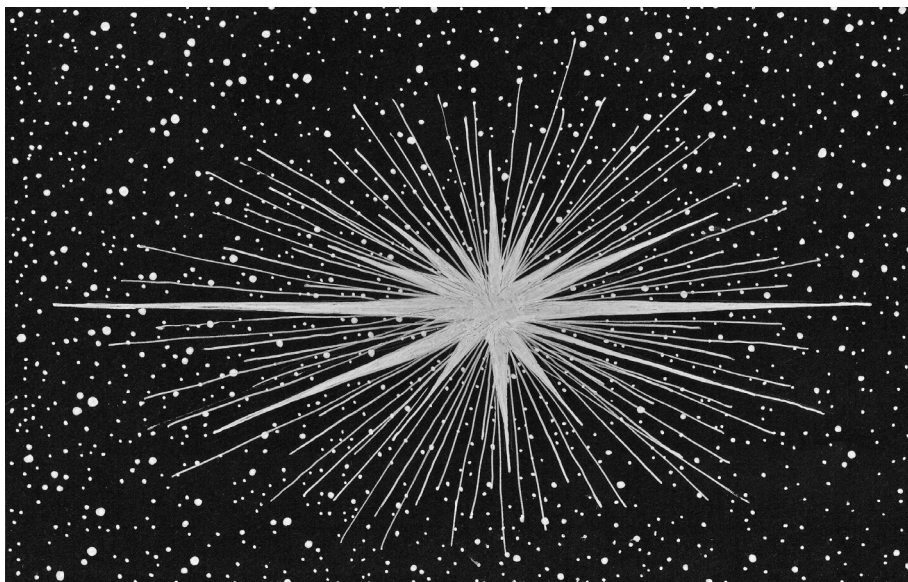


Figura 1. Supernova: una fucina cosmica di ferro ed elementi pesanti (disegno di Enea Marchetti).

Mi scuso con i lettori se ho ridotto in poche righe e quindi molto semplificato la descrizione dei complicati (e non ancora del tutto chiariti) meccanismi che provocano le *supernovae* e la formazione degli elementi più pesanti del ferro. Basti dire che le *supernovae* sono l'ultimo stadio di vita di molte stelle e che a loro volta generano nuove stelle e nuovi pianeti: nella nostra Galassia si verificano 2 o 3 *supernovae* ogni secolo e in tutto l'universo osservabile si registrano tra 200 e 300 *supernovae* all'anno.

Quindi il nostro ferro viene da molto molto lontano ed è vecchio di più di 5 miliardi di anni. Il ferro è l'elemento presente in maggior quantità sul nostro pianeta (35%): vivendo sulla superficie del nostro pianeta non ce ne accorgiamo (nella crosta terrestre solo il 5% è ferro), ma le parti più interne del nostro pianeta (il nucleo e il mantello) sono fatte prevalentemente di ferro.

L'abbondanza del ferro è dovuta alla particolare costituzione del suo nucleo atomico: il nucleo del ferro ha infatti la più alta energia di legame nucleare rispetto a tutti gli elementi noti, quindi nei processi nucleari che avvengono nelle stelle gli elementi più leggeri tendono a diventare ferro per fusione nucleare (cioè combinazione di più nuclei leggeri) e nelle *supernovae*, dove si formano gli elementi più pesanti, questi tendono a diventare

ferro per fissione nucleare (rottura di un nucleo pesante in più nuclei leggeri), in entrambi i casi con liberazione di grandi quantità di energia. Detto in altro modo, il ferro è l'elemento più pesante che si può formare per fusione di elementi più leggeri (ciò che avviene nelle stelle) ed è l'elemento più leggero che si può formare per fissione di elementi più pesanti.

Una volta intrappolato nel nostro pianeta, il ferro si trova a temperature troppo basse per subire modifiche del suo nucleo (cioè né fusioni né fissioni del nucleo), ma subisce diverse trasformazioni chimiche, cioè quelle trasformazioni relative alle combinazioni di più atomi per formare molecole: in particolare il ferro che rimane nella crosta terrestre, per la presenza dell'atmosfera ricca di ossigeno, si trasforma in vari composti chimici (ossidi, idrati e solfuri). Per ottenere il ferro questi composti (chiamati minerali) vanno sottoposti ad un processo di riduzione, che è il processo inverso a quello di ossidazione avvenuto nella crosta terrestre nell'arco di alcuni miliardi di anni.

Introduzione

Oggi il ferro è presente in numerosissimi settori della nostra vita quotidiana (edilizia, agricoltura, industria, mezzi di trasporto, armi, giocattoli, arredamento, elettrodomestici, ecc.) e in quantità così massicce che quasi non ci facciamo caso, quasi fosse una materia prima disponibile in natura in quantità (quasi) inesauribile, come l'aria o l'acqua.

E invece è un materiale prodotto dall'uomo mediante un processo piuttosto complesso e la cui storia accompagna e condiziona profondamente la storia della nostra civiltà negli ultimi 3000 anni e la cui evoluzione ha permesso una sorprendente accelerazione del nostro sviluppo materiale.

Oggi si producono ogni anno circa 1,6 miliardi di tonnellate di acciaio (che è il prodotto più importante fatto di ferro): 1.600.000.000 t/a! Un quantitativo mostruoso, difficile da immaginare, che a sua volta richiede quantitativi dello stesso ordine di grandezza di minerale e carbone. Rapportato alla popolazione mondiale, questo quantitativo rappresenta un consumo di circa 230 kg per abitante all'anno. Un altro dato che ne sottolinea l'importanza è la sua preponderanza rispetto agli altri metalli: oggi il ferro rappresenta circa il 95% di tutti i metalli prodotti!

La sua onnipresenza è dovuta ad una combinazione di fattori favorevoli che lo rendono unico e tuttora insostituibile e imbattibile: ottime proprietà meccaniche, grande disponibilità di materie prime (minerale e carbone) e basso costo di produzione.

Dopo le "invenzioni" dell'agricoltura e dell'allevamento del bestiame, tanto importanti da dare nome alla "rivoluzione neolitica", quella dei metalli (e del ferro in particolare) è la scoperta più importante dell'umanità.

Se confrontiamo l'evoluzione che avviene prima della rivoluzione neolitica con quella che avviene dopo, vediamo che prima, finché l'uomo è cacciatore e raccoglitore, c'è un'evoluzione biologica e tecnologica lentissima: nell'arco di più di 2 milioni di anni compaiono diverse specie di *ominidi* (capaci di costruirsi strumenti per facilitare la caccia e la raccolta) e come

unico strumento artificiale (cioè costruito dall'uomo) la pietra scheggiata, che conosce solo una lenta evoluzione nell'arco di due milioni di anni per diventare uno strumento mano a mano più efficace.

Pensate, se datiamo a 2,5 milioni di anni fa la comparsa dei primi utensili in pietra scheggiata, per 2,49 milioni di anni la pietra rimane l'unico materiale lavorato dall'uomo: più esattamente l'unico materiale non deperibile, di cui quindi possiamo ricostruire l'evoluzione con buona precisione. Nello stesso periodo compaiono e scompaiono numerose specie di *ominidi*.

Cioè l'evoluzione tecnologica procede con estrema lentezza, come l'evoluzione biologica: è come se, per elaborare strumenti più efficaci, l'uomo necessitasse di una serie di modifiche del suo organismo (soprattutto del suo cervello).

Poi l'ultima specie umana – *homo sapiens* – originatosi in Africa tra 150.000 e 200.000 anni fa, dopo essere uscita dall'Africa circa 50.000 anni fa per popolare rapidamente tutti i continenti, dà luogo prima alla rivoluzione neolitica (circa 10.000 anni fa) e poi all'invenzione dei metalli (8000 anni fa): da allora la civiltà umana conosce un'accelerazione formidabile che ci porta al mondo di oggi. E, durante questo susseguirsi di nuove invenzioni e nuove tecnologie, non c'è nessuna evoluzione biologica: oggi siamo *homo sapiens* come lo eravamo prima della rivoluzione neolitica. L'evoluzione tecnologica è diventata molto più veloce dell'evoluzione biologica. Anzi, si ha un'evoluzione biologica inattesa, nel senso che le altre specie di *homo* presenti alla nascita di *homo sapiens* si estinguono una dopo l'altra, lasciando *homo sapiens* come unico sopravvissuto.

Insomma, la nascita della metallurgia, come la nascita dell'agricoltura e dell'allevamento, rappresenta un momento fondamentale per una brusca ed eccezionale accelerazione dell'evoluzione dell'umanità.

Di questa accelerazione il ferro è causa ed effetto. Oggi si è arrivati a produrre 1,6 miliardi di tonnellate di acciaio e si prevede che continui a crescere: viene spontaneo porsi alcune domande sul futuro dell'umanità. Per quanto tempo disporremo di riserve di minerali ferrosi sufficienti per continuare con questi ritmi produttivi? E quali alternative abbiamo quando queste riserve si esauriranno? (Infatti non c'è dubbio che queste riserve prima o poi si esauriranno, a meno che la specie umana si estingua prima). Cercheremo di scrutare il nostro futuro nell'ultimo capitolo di questo libro. Ma non è piuttosto inquietante sapere che si prevede che le riserve di minerali ferrosi dovrebbero esaurirsi entro la fine di questo secolo e che ad oggi non esistono alternative al ferro?