

## TRASFERIMENTO DI CONOSCENZA TECNOLOGICA E INNOVAZIONE IN EUROPA (1200-1800)\*

*Stephan R. Epstein*

1. Il ruolo della tecnologia nel processo di transizione dall'economia preindustriale, di tipo «malthusiano», a quella industriale dell'Europa del XVIII e XIX secolo, pur rappresentando uno dei temi di maggior rilevanza per la storia economica, non è stato ancora del tutto compreso.

In particolare, la tesi che imputa l'estrema limitatezza del cambiamento tecnologico del periodo precedente l'Ottocento alla scarsa definizione e regolamentazione dei diritti di proprietà intellettuale e all'assai diffusa tendenza delle corporazioni all'esercizio del diritto alla rendita mal si concilia con il fatto che il fiorire dell'innovazione tecnologica nel XVIII secolo avvenne nell'ambito di contesti istituzionali non troppo diversi da quelli del 1300<sup>1</sup>.

Per risultare plausibile, una spiegazione dello sviluppo tecnologico dell'Europa preindustriale deve tenere conto di tre fatti, ormai acquisiti, che attengono alle ragioni per cui l'Europa si industrializzò per prima, nonostante intorno al 1150 si trovasse ancora in condizioni di forte arretratezza tecnologica rispetto alle grandi civiltà asiatiche. Innanzitutto, la rivoluzione tecnologica nell'Europa del XVIII secolo e dell'inizio del XIX fu il risultato di un processo di innovazione incrementale su piccola scala, le cui origini risalgono addirittura all'alto Medioevo. Tuttavia, nel confronto con altre civiltà coeve, non colpisce tanto il fatto che nell'Europa preindustriale il progresso tecnologico avvenne a un ritmo più sostenuto rispetto ad altrove, quanto che tale progresso si mantenne costante e ininterrotto. Per contro, lo sviluppo tecnologico delle grandi civiltà asiatiche, come l'India o la Cina, alternò momenti di fioritura relativamente brevi, della durata di pochi secoli per volta, a lunghe fasi di semi stagnazione.

In secondo luogo, nell'Europa preindustriale l'ubicazione geografica della *leadership* tecnologica variò nel corso del tempo. Fra i secoli XI e XIX, la fron-

\* Un sentito ringraziamento da parte del coordinatore della sezione va a Rita Astuti, Mark Epstein e Catia Brilli per la revisione del testo.

<sup>1</sup> D.C. North, *Structure and change in economic history*, New York, W.W. Norton, 1981; J. Mokyr, *The gifts of Athena. Historical origins of the knowledge economy*, Princeton-Oxford, Princeton University Press, 2002.

tiera tecnologica dell'Europa si spostò considerevolmente verso Nord-Ovest: dal Mediterraneo centro-orientale all'Italia settentrionale durante il XIII e XIV secolo, alla Germania meridionale e alla Boemia verso la fine del XV, ai Paesi Bassi meridionali nel XVI, alla Repubblica olandese e infine alla Gran Bretagna durante il XVII e il XVIII secolo<sup>2</sup>. Ciascun nuovo *leader* regionale aggiunse le innovazioni dei predecessori al proprio *stock* di conoscenze locali, ricombinando il tutto in modo tale da promuovere il progresso tecnologico. La *leadership* era temporanea, preda, nel tempo, della sclerosi della tecnologia, del calo dei ritorni marginali e dell'esercizio del diritto alla rendita di produttori ed *élites*<sup>3</sup>.

Infine, il *technical knowledge* (la conoscenza tecnologica) degli artigiani e degli ingegneri dell'età preindustriale era in larga misura basata sull'esperienza<sup>4</sup>. Di conseguenza, virtualmente tutta la conoscenza tecnologica preindustriale – che intendo definire semplicemente come la conoscenza del modo in cui fare le cose, e farle bene – doveva essere trasferita in prima persona. Il passaggio della *leadership* tecnologica da una regione all'altra, descritto ora, poteva perciò avvenire soltanto se i tecnici avevano la possibilità di sposarsi e trasferire le proprie conoscenze da un luogo all'altro. E si può senz'altro sostenere che questo avveniva più facilmente in Europa di quanto non avvenisse in altri paesi, poiché i tecnici europei non appartenevano a comunità di natura ascrittiva (basate cioè su legami di sangue, di religione o di luogo) e beneficiavano di una società che stimolava la competizione nella ricerca di *expertise* tecnologica all'interno di un sistema politico ed economico vasto e frammentato<sup>5</sup>.

<sup>2</sup> K.A. Davids, *Shifts of technological leadership in early modern Europe*, in J. Lucassen, K. Davids, eds, *A miracle mirrored. The Dutch Republic in European perspective*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995, pp. 338-366.

<sup>3</sup> Si potrebbero fare considerazioni sul fatto che nell'Asia dell'età preindustriale non è possibile osservare un simile processo di diffusione tecnologica lenta, incrementale e di ricombinazione sotto diverse condizioni sociali, economiche e istituzionali. Al contrario, la *leadership* tecnologica sembra essersi mantenuta nelle stesse regioni (la Cina sudorientale, l'India occidentale) per periodi di tempo estremamente lunghi, aumentando in misura significativa la probabilità di una sclerosi tecnica diffusa.

<sup>4</sup> A.S. Reber, *Implicit learning and tacit knowledge. An essay on the cognitive unconscious*, Oxford-New York, Oxford University Press, 1993.

<sup>5</sup> Benché forme ascrittive di appartenenza a una comunità non costituissero ostacoli insormontabili alla mobilità in Cina (tali barriere erano più alte in India), la Cina può non aver posseduto il tipo di *pull factors* di natura economica che stimolarono la mobilità dei tecnici in Europa, poiché i loro settori tecnologicamente più avanzati erano concentrati dentro e intorno a officine sotto il controllo dell'Impero; alla Cina mancava inoltre quel genere di supporto istituzionale non ascrittivo, come le corporazioni artigiane, che riducesse i costi di assorbimento dell'informazione tecnica che proveniva dai tecnici immigrati. Di conseguenza, il costo medio del trasferimento tecnologico era probabilmente più basso nell'Europa preindustriale, se paragonato con altre società.

## 719 Trasferimento di conoscenza tecnologica in Europa (1200-1800)

Le implicazioni per la storia economica dell'età preindustriale del modo in cui il funzionamento cognitivo di base limita le modalità di espressione, elaborazione e trasmissione della conoscenza tecnologica devono ancora essere esaminate in maniera dettagliata. Questo saggio si interroga su come le società dell'Europa preindustriale furono in grado di generare innovazione tecnologica crescente, seguendo tre principali linee guida: come veniva *immagazzinata* la conoscenza tecnologica nell'Europa preindustriale, al fine di evitarne la perdita? Come venivano usati, in chiave euristica, i mezzi di trasmissione taciti, visuali, verbali e scritti? Come veniva trasmessa la conoscenza, sia quella *già nota* che quella *di nuova elaborazione*? Mi concentrerò principalmente sul periodo precedente il 1700, al fine di sottolineare le somiglianze con le condizioni del XVIII secolo, maggiormente conosciute. Il paragrafo 2 discute la natura dell'*experiential knowledge* (la conoscenza basata sull'esperienza) e il suo trasferimento intergenerazionale. Il paragrafo 3 affronta il tema del trasferimento di tecnologia tra pari, incluse la codifica tecnica e l'euristica. Il paragrafo 4 si occupa del trasferimento di tecnologia nella dimensione spaziale. Il paragrafo 5 conclude.

2. *L'acquisizione dell'«experiential knowledge».* Nell'affrontare il tema della conoscenza basata sull'esperienza, posseduta dai tecnici dell'età preindustriale (artigiani e ingegneri), parto dalla premessa che i comportamenti intelligenti, da lungo tempo associati alla padronanza aperta e consapevole del funzionamento cognitivo, siano di più facile comprensione se considerati come il risultato di capacità sia esplicite che implicite. Di conseguenza, la conoscenza basata sull'esperienza comprende la conoscenza implicita o tacita, la conoscenza non proposizionale e non lineare (incluso l'ambito dell'immaginario, che contiene componenti sia esplicite che implicite), e la conoscenza esplicita e proposizionale, che è lineare e verbale o matematica. Per conoscenza implicita si intende quella conoscenza che è in larga misura acquisita indipendentemente da tentativi consci di apprendere e per lo più in assenza di conoscenza esplicita di ciò che è stato acquisito. La conoscenza implicita si fonda sulla ricerca di regole e sull'astrazione, ed è alla base dell'acquisizione di abilità. Di conseguenza, la linea di demarcazione fra conoscenza implicita e esplicita rimane sfumata, e le due vengono a formare un *continuum*, anche se la componente implicita è significativamente maggiore di quella esplicita. Nell'ambito di questa definizione, inoltre, i confini fra l'*experimental knowledge* proprio del mondo artigiano e quello proprio del mondo scientifico sono meno netti rispetto a quanto prospettato dalla diffusa convinzione che la sperimentazione e la pratica artigiane siano «non scientifiche», poiché non fondate su un soggiacente quadro concettuale o proposizionale.  
La conoscenza basata sull'esperienza è un bene, e il suo scambio e la sua diffusione richiedono che coloro che la possiedono intraprendano azioni deli-

berate per condividerla tramite forme di comunicazione dirette. Queste operazioni sono dispendiose da intraprendere e, storicamente, hanno contatto su diverse soluzioni istituzionali. Da un punto di vista analitico, può risultare utile scindere in due parti la domanda relativa a come si sia trasferita la conoscenza tecnologica: la prima concerne la trasmissione intergenerazionale, l'altra riguarda invece la trasmissione fra pari qualificati.

Nell'acquisizione di conoscenza tecnologica un primo passo consisteva in una relazione a lungo termine del tipo maestro-allievo, basata su regole formali o informali, in altre parole un apprendistato, ovvero il modo più diffuso, fra quelli elaborati dalle società umane, per trasmettere la conoscenza tecnologica al di fuori dell'ambito familiare. Nell'Europa preindustriale, le corporazioni artigiane rivestirono un ruolo dominante (benché non unico) nel porre un limite al ricorso a *training externalities* per quel che riguardava la formazione di capitale umano. Dal momento che il capitale umano futuro non può valere come garanzia d'investimento, i lavoratori poveri di risorse ma ricchi di potenziale possono non essere in grado di sostenere i costi dell'investimento necessario per sviluppare le proprie abilità, il che porta a un'offerta subottimale, da un punto di vista sociale, di manodopera qualificata. L'apprendistato di epoca preindustriale permetteva agli apprendisti di scambiare formazione a costi agevolati con salari al di sotto del livello di mercato una volta concluso l'apprendistato. Ad ogni modo, se gli apprendisti avessero potuto andarsene prima della scadenza del contratto, le imprese si sarebbero ugualmente trovate a fornire quantità subottimali di formazione. Le corporazioni artigiane supervisionavano le *performance* professionali, le condizioni di lavoro e la qualità della formazione; facevano rispettare i contratti attraverso l'iscrizione obbligatoria, le penali previste dallo statuto e il ricorso a forme di ostracismo (*blackballing*); proteggevano gli apprendisti dal rischio di una formazione di livello scadente nelle abilità specifiche del mestiere, agendo all'interno di mercati del lavoro oligopsonistici. In assenza di istruzione obbligatoria, legislazione sovralocale e burocrazie efficienti, le associazioni artigiane formali o informali erano le più preparate per far rispettare i contratti e le norme di apprendistato al di fuori della cerchia familiare. Questo fatto spiega la straordinaria longevità delle corporazioni artigiane europee, dagli ultimi decenni dell'XI secolo fino agli inizi del Novecento<sup>6</sup>.

La formazione tramite apprendistato risultava costosa per due ragioni. La prima è che l'acquisizione di abilità e di *expertise* richiede tempo. L'*expertise* dipende essenzialmente da due processi: da un lato, la ricerca a fine euristico di nuclei problematici e, dall'altro, la capacità di riconoscere i segnali che danno accesso alle conoscenze rilevanti al fine di una migliore comprensione del

<sup>6</sup> S.R. Epstein, *Craft guilds, apprenticeship and technological change in pre-industrial Europe*, in «Journal of Economic History», LVIII, 1998, 4, pp. 684-713.

problema e indicano le procedure euristiche necessarie ad affrontare i passi successivi.

Gli esperti conservano nella memoria migliaia di «pezzi» di informazione, a cui possono accedere nel momento in cui ne riconoscono i segnali rilevanti. Gli esperti utilizzano questi processi di riconoscimento per raggiungere capacità mnemoniche particolarmente elevate, riorganizzare le conoscenze in sistemi gerarchici articolati e sviluppare reti complesse di informazioni sulla base di relazioni causali. Le conoscenze sviluppate da individui meno qualificati, per contro, sono codificate secondo concetti quotidiani che rendono difficile e inaffidabile persino il recupero di quella scarsa conoscenza di cui dispongono. Di conseguenza, l'acquisizione di un'expertise di massimo livello richiede un periodo di circa dieci anni di intensa formazione; questo è vero per le attività più svariate, come gli scacchi, l'addestramento di cani, la degustazione di vini, l'esecuzione o la composizione musicale, lo sport e, è possibile, anche l'acquisizione del linguaggio<sup>7</sup>.

Non vi è ragione di credere che la durata della formazione debba essere diversa per quel che riguarda l'acquisizione di expertise in ambito pratico, come è plausibilmente confermato dalla durata dell'apprendistato tecnico nell'Europa preindustriale.

In secondo luogo, l'apprendistato era costoso perché la maggior parte delle conoscenze artigiane erano implicite o di difficile codifica<sup>8</sup>. Di conseguenza, gli statuti artigiani e le leggi che regolavano il lavoro non specificavano mai i contenuti della formazione stessa. Le arti e i mestieri non venivano appresi in maniera prescrittiva, perché la formazione risiedeva nella mente e nelle mani del maestro artigiano; perciò, gli artigiani verificavano la qualità della formazione sulla base del risultato. L'acquisizione di expertise tecnica era sancita attraverso il titolo di maestro. A partire dal tardo XIII secolo, e con frequenza crescente dalla fine del XIV, molti candidati al titolo di maestro dovevano dimostrare le loro abilità producendo un pezzo di grande maestria<sup>9</sup>. Tale opera doveva combinare la realizzazione concreta delle conoscenze collettive con

<sup>7</sup> K.A. Ericsson, R.Th. Krampe, C. Tesch-Romer, *The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance*, in «Psychological Review», C, 1993, 3, pp. 363-406.

<sup>8</sup> L'importanza della conoscenza e dell'esperienza implicite offriva un vantaggio intrinseco all'impiego di membri della famiglia, che avevano preso confidenza in giovane età con il mestiere e generavano livelli alti di fiducia, soprattutto nei settori più tecnicamente avanzati come quello dei minatori, della metallurgia, della cantieristica navale e dell'edilizia di alta qualità, e della produzione di orologi e di strumentazione. Per ragioni simili, la conoscenza artigiana altamente specializzata, e le sue tecniche, erano trasmesse attraverso generazioni familiari interne al mestiere; si veda per esempio J. Brown, *Mathematical instrument-makers in the Grocers' Company 1688-1800*, London, Science Museum, 1979.

<sup>9</sup> W. Cahn, *Masterpieces. Chapters on the history of an idea*, Princeton (NJ), Princeton University Press, 1979.

la creatività e il virtuosismo individuali (il «genio»). Si trattava di una dimostrazione di abilità, e di sicurezza in se stessi e nel fatto che il prodotto proposto potesse essere costruito e funzionare a dovere; tale prova accreditava l'esperto come una persona che ha assimilato la tradizione così bene da poterla adattare, modificare e trascendere. L'*expertise* rendeva inoltre più facile formulare esplicitamente l'euristica e le pratiche non verbali, come nota Salviati, nel primo giorno dei *Discorsi* di Galileo, con la celebre osservazione:

Largo campo di filosofare a gl'intelletti specolativi parmi che porga la frequente pratica del famoso arsenale di voi, Signori Veneziani, ed in particolare in quella parte che mecanica si domanda; atteso che quivi ogni sorte di strumento e di machina vien continuamente posta da numero grande d'artefici, tra i quali, e per l'osservazioni fatte dai loro antecessori, e per quelle che di propria avvertenza vanno continuamente per se stessi facendo, è forza che ve ne siano de i peritissimi e di finissimo discorso<sup>10</sup>.

In altre parole, l'*expertise* era anche una precondizione alla base della capacità di insegnamento, e insegnare agli apprendisti aiutava a risolvere l'enigma di come rendere pubblica la conoscenza tecnologica implicita.

**3. La conoscenza collettiva e l'euristica tecnica.** L'apprendistato diede un contributo cruciale alla natura collettiva o «distribuita» della conoscenza tecnologica preindustriale, elemento che costituì un tratto essenziale del progresso tecnologico. Tuttavia, la trasmissione di sapere da una generazione all'altra contribuì all'innovazione in misura minore rispetto alla condivisione di conoscenze tra pari qualificati.

La condivisione di conoscenze tecnologiche tra pari avvenne *in loco*, come pure attraverso la migrazione. Per quanto le pratiche alla base sia della costruzione, della riparazione e dell'utilizzo delle macchine, sia della cantieristica navale o dell'edilizia, sia dell'escavazione di miniere e dell'orologeria e così via fossero necessariamente oggetti di conoscenza comune o accessibile (non foss'altro che per il fatto che i tecnici non potevano continuare a reinventare ogni volta la ruota)<sup>11</sup>, le prove dirette della condivisione *in loco* sono molto più scarse rispetto a quelle della condivisione legata alle migrazioni. Quest'ultima generava, infatti, una serie di dispute e necessità tali da lasciare tracce scritte. La maggior parte dei dati disponibili sono associati ai grandi cantieri, uno dei settori *high tech* dell'età preindustriale. Per esempio, il capomastro o uomo di Chiesa Villard de Honnencourt asseriva nella sua raccolta di disegni (1215-20 ca.) di aver stabilito alcuni punti con altri maestri *inter se disputando* – espressione tecnica da lungo tempo utilizzata nelle scuole universitarie per indicare il dibattimento for-

<sup>10</sup> G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla mecanica et i movimenti locali*, Leiden, Eisevier, 1638, pp. 1-2.

<sup>11</sup> G. Hollister-Short, *Invisible technology, invisible numbers*, in «Icon», 1995, 1, pp. 132-147.

male – sottolineando in tal modo che anche la sua arte poggiava su saldi principi intellettuali, che potevano essere sistematicamente argomentati. Nel 1459, capomastri e muratori che lavoravano alla costruzione delle principali chiese dell'Europa centrale si riunirono a Regensburg e stabilirono che nessuno doveva ricevere formazione in cambio di denaro, il che implicava che le informazioni dovevano essere condivise gratuitamente<sup>12</sup>. Similmente, l'abitudine di indire gare d'appalto per la realizzazione di progetti edili o artistici, ben radicata in Italia già dal tardo Trecento e diffusasi altrove prima del Cinquecento, presumeva che i candidati possedessero un certo nucleo comune di competenze tecniche, che i committenti erano in grado di valutare solo indirettamente. Esposizioni pubbliche da parte degli ingegneri – comprensibili dai loro pari ma non dalla gente comune – sono registrate fin dagli ultimi decenni del XIV secolo, quando Giovanni de' Dondi da Padova esibì al pubblico il suo astrario; nel XVI secolo, gli artigiani di Amburgo e Norimberga si sfidarono dando pubblica mostra delle proprie abilità tecniche. E, in una lettera a Mersenne datata 7 dicembre 1642, Cartesio descrive l'*ingénieur* Etienne de Villebressieux come «un uomo assai curioso che conosceva molti di quei piccoli segreti della chimica che si scambiano tra appartenenti al mestiere».

In ogni caso, la prova più evidente della condivisione di conoscenza *in loco* è di tipo indiretto. Ancora una volta, la documentazione più sistematica si ritrova nei registri dei grandi cantieri laici o ecclesiastici che ponevano complesse sfide tecniche e attraevano lavoratori qualificati e ingegneri da tutta Europa. La costruzione di cattedrali, in particolare, dimostra sia il considerevole livello di innovazione strutturale che ne derivò, sia i suoi inevitabili limiti. La complessità delle cattedrali gotiche faceva sì che fosse pratica comune, già nel XII secolo, quando furono erette le prime nuove cattedrali, chiamare esperti esterni per una consulenza sui principali problemi di ordine strutturale. Questo fatto stimolò la sperimentazione – nell'utilizzo dei contrafforti, nell'ampiezza della navata laterale e l'altezza di quella centrale, nell'altezza degli speroni degli archi rampanti e nell'inclinazione del tetto –, tendenza che perdurò anche dopo il 1500, quando lo stile gotico cadde in disuso. Un esempio di tale sperimentazione è dato dal «coefficiente di snellezza», ovvero il rapporto tra l'altezza e l'ampiezza dei pilastri di sostegno: quanto più alto è il rapporto, tanto più la struttura finale risulta «leggera». Il coefficiente di snellezza della cattedrale di Chartres, completata nel 1194, era di 4,4; trent'anni più tardi, ad Amiens e Beauvais, il rapporto era raddoppiato; entro il 1350, per la cattedrale di Palma, i capomastri ottennero il ragguardevole rapporto di 13,8<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> A. Black, *Guilds and civil society in European political thought from the twelfth century to the present*, London, Methuen, 1984, p. 9.

<sup>13</sup> R. Mark, *Structural experimentation in Gothic architecture*, in «American Scientist», 1978, 6, pp. 542-550.

Man mano che le cattedrali crescevano in altezza, tuttavia, i costruttori si trovarono ad affrontare problemi strutturali sempre crescenti. La navata inferiore, il lucernario e il tetto erano soggetti a una forza d'urto maggiore da parte del vento e degli agenti atmosferici, e le fondamenta erano soggette a maggiori assestamenti e pressione verticale. I costruttori, non avendo a disposizione prima del XIX secolo una teoria delle forze strutturali applicabile, non avevano alcun modo di prevedere gli effetti strutturali su una scala maggiore. La soluzione più frequente consisteva nel costruire lentamente e per moduli, osservando gli effetti delle nuove tensioni nel corso del tempo, e ricorrendo a riparazioni e innovazioni quando necessario. L'arco rampante fu un'innovazione strutturale cruciale, introdotta in questo modo: «tutti gli archi rampanti nelle grandi chiese del Nord [della Francia] prima della seconda metà del XX secolo sembrano [...] esser stati aggiunti come espedienti casuali solo dopo che si erano manifestati dei cedimenti o [...] che le volte avevano già spinto le pareti fino al collasso». In altre occasioni, come la costruzione della cupola del Brunelleschi a Firenze, «nuove idee strutturali furono deliberatamente provate su scala più piccola»<sup>14</sup>.

Il raggiungimento dell'*expertise*, come abbiamo visto, è indice della capacità di mostrare flessibilità di fronte alle regole. Le principali modifiche progettuali venivano realizzate al bisogno, in risposta a cambiamenti da parte della committenza o a problemi strutturali. Per esempio, quando il Brunelleschi non fornì ai manovali un modello tridimensionale dell'Ospedale degli Innocenti a Firenze, i muratori e gli incisori deviarono dal suo progetto originale. Inizialmente concepito come un blocco (*cuadro*) maestosamente isolato dagli altri edifici, il progetto del palazzo dell'Escorial di Filippo II fu gradualmente esteso fino a comprendere vari edifici esterni. A vent'anni dall'inizio della costruzione, «gli artigiani erano ancora incerti se il santuario dovesse avere forma rettangolare o absidale, e [al capomastro Herrera] furono richiesti i disegni per chiarire il problema». Nel 1577 «sorsero gravi dubbi sulla stabilità del supporto alla cupola, dove le pietre mostravano segni di fratture». Si riporta che il timore espresso dalla collettività costrinse il riluttante Herrera a ridurre l'altezza del piedistallo della cupola di ben undici piedi e a eliminare le nicchie, che riducevano la massa dei pilastri<sup>15</sup>. Più o meno nello stesso periodo, architetti e capomastri veneziani rifiutarono di approvare un piano unico per la costruzione del ponte di Rialto, che fu perciò costruito in diverse fasi, ciascuna delle quali con un piano autonomo<sup>16</sup>. Un secolo più tardi, Christopher Wren

<sup>14</sup> R.J. Mainstone, *Structural theory and design before 1742*, in «Architectural Review», CX-LIII, 1968, April, pp. 303-310, p. 305.

<sup>15</sup> G. Kubler, *Building the Escorial*, Princeton, Princeton University Press, 1982, pp. 82, 98.

<sup>16</sup> D. Calabi, P. Morachello, *Le Pont du Rialto: un chantier public à Venise à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle*, in T. Ruddock, ed., *Masonry bridges, viaducts and aqueducts*, Aldershot, Aldgate, 2000, pp. 109-132.

«adattò il progetto [della cattedrale di St. Paul] via via che si presentavano i difetti, o che la sua crescente esperienza suggeriva nuove migliorie». Anche se come filosofo naturale sviluppò un'errata teoria degli archi, come ingegnere pratico, che utilizzava pochi o nessun calcolo, ebbe grande successo, poiché impiegava l'euristica della costruzione e dell'ingegneria pratica<sup>17</sup>.

**3.1. Prevedibilità, codifica e innovazione.** Una visione meno caritatevole di tali flessibilità potrebbe far pensare a un empirismo estremo e all'incapacità di fare previsioni. Per esempio, le soluzioni per i problemi *strutturali* nella costruzione delle cattedrali, che ho appena descritto, inevitabilmente dipendevano molto dalle *dimensioni* della cattedrale, come il rapporto fra altezza e ampiezza della navata centrale, e l'altezza e l'angolo fra tetto e lucernario. Nello stile gotico, le dimensioni si basavano su criteri geometrici, che, nell'Europa nordoccidentale, sembra fossero in larga misura derivati da semplici manipolazioni del quadrato. Anche se le regole o gli algoritmi non furono mai completamente formulati, fecero sorgere specifici problemi ingegneristici e, di conseguenza, soluzioni tecniche piuttosto specifiche.

Benché nelle costruzioni in stile gotico lo sviluppo di *rules of thumbs* o algoritmi euristici fornisse soluzioni ragionevolmente sicure ed economiche, riducendo fra l'altro il tempo di calcolo e di progettazione, esso tendeva anche a stabilire un'identità concettuale tra struttura costruttiva e forma<sup>18</sup>. Ciò rendeva difficile trasferire la teoria strutturale sviluppatisi in uno specifico cantiere gotico di una specifica regione a un altro luogo che avesse una diversa forma ideale. Un esempio dei problemi tecnici e concettuali che potevano derivarne è rappresentato da quanto accadde nel cantiere della nuova cattedrale di Milano all'inizio del XV secolo. Le difficoltà sorse perché Milano era all'epoca assai arretrata da un punto di vista architettonico, e le abilità costruttive locali erano inadeguate. Fin dall'inizio, perciò, i milanesi chiamarono esperti dall'Italia centrale – allora più progredita dal punto di vista architettonico e tecnico, benché anch'essa ancora periferica rispetto alla fucina del potente movimento gotico nel lontano Nord europeo – per avere consigli sulla forma e la struttura della nuova chiesa. È importante notare che i disegni delle piante erano basati su semplici manipolazioni del triangolo, con il risultato che la navata centrale e il tetto della cattedrale erano più bassi e più ampi rispetto a quelli delle cattedrali realizzate nella culla del mondo gotico oltre le Alpi.

Molto presto sorse tuttavia problemi strutturali, e per questo i milanesi richiesero la consulenza di esperti del Nord Europa, con effetti davvero esplosivi. Nel 1400, Jean Mignon, un capomastro della Francia settentrionale, in-

<sup>17</sup> S.B. Hamilton, *The place of Sir Christopher Wren in the history of structural engineering*, in W. Addis, ed., *Structural and civil engineering design*, Aldershot, Aldgate, 1998, pp. 193-208.

<sup>18</sup> R.J. Mainstone, *Structural theory and design before 1742*, cit.

sistette per applicare i propri principi progettuali su base geometrica ai contrafforti della cattedrale. «Sosteneva appassionatamente che soltanto alti contrafforti rampanti – una soluzione rigorosa basata sulla *scientia*, ovvero sulla proporzione geometrica – potevano dar vita a una struttura stabile: “la mera tecnica [*ars*] senza rigorosa conoscenza [*scientia*] è inutile”»<sup>19</sup>. I maestri lombardi ribatterono che la *scientia* senza l'*ars*, senza la conoscenza pratica derivata dall'esperienza, era altrettanto inutile. Ma la discussione non riguardava, di fatto, la teoria o la pratica prese individualmente, bensì i legami applicativi fra le due cose. Per Jean Mignon, la forma (basata sulla *scientia*) definiva la struttura (costruita attraverso l'*ars*) ed esisteva un'unica forma legittima, derivata dalle modificazioni geometriche del quadrato, in cui egli era esperto. Il disaccordo nacque perché i milanesi preferivano un'altra forma, derivata da una diversa, benché ugualmente «scientifico», procedura geometrica. Tuttavia, essi non avevano a disposizione la manodopera qualificata ed egregiamente formata, necessaria per costruire la corrispondente struttura, e furono perciò costretti a fare marcia indietro, affidandosi al metro di giudizio e all'esperienza locali.

Il problema di come combinare, o sintetizzare, differenti tradizioni empiriche che non operavano una chiara distinzione fra struttura costruttiva e forma poteva essere affrontato in diversi modi. Il primo consisteva nel codificare le tradizioni esistenti. Tra la fine del XV e l'inizio del XVI secolo, numerosi capimastri tedeschi (Matthäus Roriczer, Lorenz Lechler e altri) compilaroni quaderni o manuali dettagliati che riproducevano le configurazioni di forma basate sul quadrato. Le ragioni di questa operazione non sono totalmente chiare, ma uno dei fattori rilevanti fu probabilmente la crescente circolazione di maestri, muratori e apprendisti tra i cantieri dell'Europa centrale, che deve aver creato confusione e conflitto su quale fosse il cantiere la cui tradizione dovesse prevalere. Anche se non sappiamo se i capimastri tedeschi stessero cercando di sintetizzare diverse tradizioni cantieristiche, o se semplicemente mirassero a codificare la pratica dei propri cantieri locali, la loro sembra esser stata essenzialmente una forma di reazione.

L'incontro tra diverse tradizioni tecniche e di progettazione poteva anche, ad ogni modo, generare nuove procedure sotto il profilo cognitivo. Nella Spagna del XVI secolo, dove la tensione fra la tradizione costruttiva gotica e quella del Rinascimento italiano era particolarmente forte, il mastro costruttore Rodrigo Gil de Hontañón tentò di sistematizzare la progettazione creando una sequenza di procedure codificate che dovevano essere seguite nei grandi progetti edilizi ecclesiastici. Gli algoritmi di Gil, elaborati intorno al 1540, ave-

<sup>19</sup> A. Grafton, *Leon Battista Alberti. Master builder of the Italian Renaissance*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 2000, p. 268; O.G. von Simson, *The Gothic cathedral: design and meaning*, in W. Addis, *Structural and civil engineering design*, cit., pp. 159-170.

vano tre obiettivi. Miravano a combinare i metodi progettuali gotico e classico, basati sulla proporzione, e a provare la loro fondamentale uguaglianza. Tentavano inoltre di stabilire una «scienza» indipendente per la progettazione strutturale. Infine, miravano a stabilire una nuova euristica collettiva sulla base della quale i muratori di un cantiere potessero lavorare. In questo sforzo di sintetizzare e codificare due estetiche e due tradizioni costruttive apparentemente incompatibili, Gil fu portato a sperimentare pratiche gotiche su archi classici e ad «applicare nuove procedure aritmetiche alle volte gotiche»<sup>20</sup>. Per valutare l'euristica artigiana e ingegneristica è opportuno distinguere tra i problemi ben strutturati – che appaiono chiaramente definiti per quel che riguarda situazioni, operatori e criteri che ne sanciscono il successo e che richiedono una limitata conoscenza specifica – e i problemi mal strutturati – che per essere risolti in maniera efficace richiedono una vasta conoscenza basata sull'esperienza e il ricorso a una combinazione di processi induttivi e deduttivi. Progettare edifici, per esempio, è un compito scarsamente strutturato. I criteri che ne sanciscono il successo sono complessi e mal definiti, ed emergono spesso nel corso del processo risolutivo. La soluzione richiede una flessibilità che spesso si manifesterà come mancanza di precisione, un appoggio alla «può andare» e «va abbastanza bene», che i teorici di stampo più prettamente matematico trovano sconcertante. A uno sguardo superficiale, i compiti inerenti alle costruzioni navali di epoca preindustriale possono apparire più strutturati rispetto all'edilizia, ma di fondo presentavano caratteristiche ugualmente indefinite: la differenza fondamentale risiedeva nel fatto che la cantieristica navale non poteva procedere attraverso il *testing* di moduli individuali come avveniva per l'edilizia, poiché l'esito positivo poteva essere verificato soltanto una volta varata la nave. Tuttavia, gli strumenti euristici disponibili nell'edilizia e nella cantieristica navale erano particolarmente simili. Come i capimastri, gli ingegneri navali ottenevano la stabilità strutturale grazie a una «disciplina geometrica» condivisa e mnemonicamente ricca, e grazie ad una «più ampia comprensione tacita o intuitiva delle condizioni di equilibrio statico» basato sulle due componenti «spaziale e muscolare»<sup>21</sup>. I carpentieri navali veneziani, per esempio, basavano le loro dimensioni su un modulo che normalmente costituiva il baglio della nave in progetto; questo veniva moltiplicato secondo una proporzione fissa per ottenere la lunghezza del ponte, mentre a sua volta una sua frazione determinava la lunghezza della chiglia. Inoltre, il metodo di costruzione modulare veneziano, o quello mediterraneo, adoperava il sistema del fasciame a paro. Tra la fine del XV e l'inizio del XVI secolo le navi del Nord Atlantico, che in precedenza venivano

<sup>20</sup> S.L. Sanabria, *The mechanization of design in the 16<sup>th</sup> century: the structural formulae of Rodrigo Gil de Hontañón*, in W. Addis, *Structural and civil engineering design*, cit., pp. 1-14.

<sup>21</sup> R.J. Mainstone, *Stability concepts from the Renaissance to today*, ivi, pp. 171-192.

costruite a fasciame sovrapposto, iniziarono a essere costruite secondo il metodo mediterraneo. Migrando da una località geografica all'altra, prima verso il Portogallo e la Spagna, poi verso l'Inghilterra e l'area anseatica, la tecnologia si modificò passando da una forma originaria puramente tacita e dimostrativa, priva di alcun supporto grafico, a un sistema che contava sempre più sulla progettazione grafica.

I veneziani avevano messo per iscritto il loro schema di costruzione navale già nel XV secolo, seguiti dai portoghesi nella seconda metà del XVI secolo, ma questi disegni erano puramente descrittivi e non erano utilizzati a scopo progettuale. Sembra che le tecniche di progettazione basate sullo studio delle proporzioni (*proportional design*) a scopo di progettazione siano state introdotte dall'inglese Matthew Baker negli anni Ottanta del Cinquecento e si siano diffuse a partire dalla terza decade del Seicento insieme al modellismo tridimensionale, per divenire la norma in Inghilterra dopo la guerra civile. I francesi, spronati dal grandioso ampliamento della flotta militare voluto da Colbert, introdussero il *design* leggermente più tardi, ma con metodi e strumenti geometrici più sofisticati. Sembra che queste innovazioni abbiano avuto due implementazioni pratiche. Da un lato, il *design* a fini di progettazione (*planning design*) può aver introdotto una maggior flessibilità costruttiva. Non infranse completamente il legame fra struttura e forma, poiché i progettisti non disponevano ancora delle adeguate teorie idrostatiche e idrodinamiche; modellare nuove navi sulla base di disegni sperimentali era perciò molto rischioso. Nel caso dell'Inghilterra, inoltre, solo una parte dello scafo veniva progettata; il resto era ancora derivato geometricamente nel cantiere navale. Tuttavia, anche con questi limiti, la progettazione in scala (*scaled design*) risultava di fatto un modo più efficace, rispetto al metodo mediterraneo basato sugli algoritmi, per tener traccia della sperimentazione in assenza di costrizioni materiali<sup>22</sup>.

D'altro canto, però, l'utilizzo del *design* in scala rese possibile pianificare navi con forme più complesse. Nel sistema mediterraneo, un'unica sagoma era sufficiente per definire l'intera forma dello scafo (tranne che per le estremità). Questa sagoma veniva usata direttamente per la sezione centrale dello scafo e per tutte quelle intermedie, mentre le parti finali (circa il 10% della lunghezza della nave a partire dalle estremità) erano costruite sulla base di una regola di curvatura o interpolante. Così la varietà di forme era governata dalla sezione centrale scelta e dai pochi parametri dell'interpolante longitudinale, che creava forme di sezione che erano parenti stretti della sezione centrale e non permettevano grande curvatura. L'introduzione e il miglioramento della progettazione in scala permise agli inglesi di introdurre due interpolan-

<sup>22</sup> D. McGee, *Ships, science and the three traditions of early modern design*, in W. Lefèvre, J. Renn, U. Schoepflin, eds, *The power of images in early modern science*, Basel-Boston-Berlin, Birkhäuser, 2003, pp. 28-46.

ti, e a i francesi di progettare navi che ne possedevano due o piú (il numero di interpolanti definiva il numero di volte in cui la curva dello scafo poteva essere modificata). Questo costituí un tipico esempio di come i *latecomers* dal punto di vista della tecnologia potevano trarre beneficio dall'esperienza dei predecessori e apportare ulteriori migliorie.

**3.2. Disegni e modelli come meccanismi euristici.** Una comparazione fra i disegni navali veneziani e portoghesi, stesi al fine esclusivo di illustrare ai non addetti ai lavori le proporzioni costruttive stabilite, e i disegni in scala inglese e francesi, che miravano invece a stabilire nuove proporzioni per i maestri costruttori, suggerisce di non dare per scontati natura e scopo della progettazione. Proviamo a considerare le piante delle cattedrali gotiche, magnifiche dal punto di vista estetico; le piú antiche ritraggono la cattedrale di Reims alla metà del XIII secolo: esse sembrano a prima vista offrire indicazioni costruttive notevolmente dettagliate. In realtà, molte piante altro non erano che copie di presentazione, disegnate dopo il completamento dell'opera; altre furono elaborate per la commissione di costruzione e, pertanto, presentano sostanziali differenze rispetto al prodotto finale; nessuna di esse sembra esser stata, di fatto, una copia di lavoro, utilizzata dagli addetti al cantiere per ragioni pratiche, dal momento che nessuna era disegnata in scala.

Vi erano due ostacoli principali all'utilizzo a fini pratici dei disegni edilizi di epoca gotica. *In primis* l'utilizzo nella progettazione di regole geometriche. Questo metodo, proprio per il fatto che non si basava su misurazioni fisse, aveva il vantaggio di essere «trasferibile»; d'altra parte però il meccanismo generava anche numeri irrazionali (come la diagonale di un quadrato) che non potevano essere facilmente riprodotti su una pianta disegnata secondo proporzioni aritmetiche.

Il secondo ostacolo all'utilizzo dei disegni fu, paradossalmente, la riscoperta della prospettiva a tre punti ad opera di Filippo Brunelleschi nella Firenze del Quattrocento, riscoperta che portò il suo amico Leon Battista Alberti a sottolineare l'uso dell'«illusionismo nella resa architettonica». Come ammise Alberti, tuttavia, il metodo prospettico non era di alcuna utilità per i progettisti e i costruttori. Furono necessarie tre generazioni di progettisti italiani per scoprire come disegnare «piani ed elevazioni non secondo il metodo prospettico ma per proiezione ortogonale, che [...] permette di mostrare ciascun elemento nella propria scala, in modo che il carpentiere e il muratore possano lavorare a partire da lì»<sup>23</sup>. Ma lo sforzo tecnico dell'Alberti ebbe un'altra conseguenza, piú auspicabile (dal suo punto di vista), e cioè quella di sostituire il ruolo tradizionale di controllore e pianificatore del capomastro con quello ben piú prestigioso di architetto-progettista.

<sup>23</sup> W. Lotz, *Studies in Italian Renaissance architecture*, Cambridge (Mass.)-London, The Mit Press, 1977, pp. XVIII-XIX.

Le planimetrie, che evitano distorsioni mentre rappresentano gli elementi spaziali dell'oggetto in modo che possa essere riprodotto, rimasero tuttavia praticamente sconosciute al di fuori dell'architettura prima del XVII secolo. In particolare, il metodo pittorico o illusionistico continuò a prevalere nel disegno dei macchinari. Anche se il grado di sofisticazione delle rappresentazioni di macchinari crebbe notevolmente nel periodo che intercorre tra i bozzetti di Villard de Honnencourt e dei suoi colleghi, risalenti agli inizi del XIII secolo, i disegni cinquecenteschi del Brunelleschi, di Francesco di Giorgio Martini e di Leonardo, e le rappresentazioni secentesche di macchine da miniera che ritroviamo nel *De re metallica* di Georgius Agricola, si trattava sempre, in un modo o nell'altro, di «false planimetrie», dal momento che lasciavano indefinite dimensioni, proporzioni e molti altri dettagli essenziali<sup>24</sup>.

Le prime proiezioni sistematiche e in scala di macchine sono, come abbiamo visto, quelle delle navi inglesi. Tuttavia, come per i disegni architettonici, lo sviluppo del *design* grafico nelle costruzioni navali può aver rappresentato più un elemento strategico nella separazione culturale e funzionale fra progettisti e costruttori, che non un progresso genuino dal punto di vista cognitivo nella realizzazione di navi nell'epoca preindustriale. Sicuramente, l'analogia solleva la questione – che non può essere affrontata in questa sede – del significato cognitivo del design grafico ai fini del progresso tecnologico. Possiamo limitarci a notare che, benché l'introduzione del *design* progettuale abbia permesso indubbiamente maggior flessibilità nella progettazione della forma, che si trattasse di un edificio o di una nave, non è tuttavia automatico che il *design* abbia avuto come effetto un evidente miglioramento ai fini dell'innovazione strutturale.

Fin dal tardo Medioevo, per veicolare le informazioni riguardo alle macchine (inclusi gli edifici) e per misurare la loro prestazione, i tecnici erano più inclini a utilizzare modelli tridimensionali in legno, argilla e gesso. Come le planimetrie disegnate, i modelli tridimensionali hanno due diversi utilizzi: 1) conservare informazioni e aiutare a comunicarle da una persona all'altra (per esempio dal progettista al cliente, al costruttore o al fornitore); 2) aiutare a generare nell'ingegnere e nel cliente il livello necessario di fiducia nel fatto che la struttura proposta funzionerà e che può essere costruita<sup>25</sup>. Benché l'utilizzo di modelli costruttivi tridimensionali sia testimoniato addirittura fin dai tempi della Mesopotamia babilonese, divenne una pratica documentata con maggior regolarità solo a partire dalla Toscana del Quattrocento; un secolo più tardi, l'utilizzo dei modelli a scopi costruttivi era menzionato come pratica affermata nei trattati di architettura di Leon Battista Alberti, Antonio Aver-

<sup>24</sup> W. Lefèvre, *The limits of pictures: cognitive functions of images in practical mechanics, 1400 to 1600*, in W. Lefèvre, J. Renn, U. Schoepflin, eds, *The power of images*, cit., pp. 69-89.

<sup>25</sup> W. Addis, *Introduction*, in Id., *Structural and civil engineering design*, cit., pp. XIII-XLIII.

lino e Francesco di Giorgio Martini. Quest'ultimo esplicitava le connotazioni cognitive proprie della costruzione di modelli: «Mentre è difficile dimostrare ogni cosa tramite i disegni, ed è assolutamente impossibile esprimere molte cose a parole, [...] così è necessario creare un modello di quasi ogni oggetto»<sup>26</sup>. Poco dopo il 1500 l'utilizzo di modelli da costruzione si diffuse nella Germania meridionale e in Francia, e circa un secolo più tardi in Inghilterra. Le informazioni disponibili a proposito della pratica di creare modelli in scala minore per i macchinari da lavoro sono molto più scarse. I primi riferimenti a un modello meccanico si trovano in una descrizione tardocinquecentesca di una nuova trafilatrice, inventata a Norimberga alla fine del Quattrocento<sup>27</sup>. Pochi anni dopo, nel maggio del 1402, ai capimastri della cattedrale di Milano fu chiesto di ispezionare gli schizzi presentati in una gara per trovare il miglior congegno meccanico per tagliare blocchi di pietra «senza forza lavoro umana»; il progetto più promettente doveva poi essere realizzato sotto forma di modello in legno in scala ridotta, il che suggerisce una combinazione ben collaudata di pianificazione, sperimentazione e dimostrazione di *expertise* meccanica, basate su schizzi e su modelli tridimensionali<sup>28</sup>.

Prima degli inizi del XVI secolo i modelli in scala ridotta venivano usati sia nelle gare di ingegneria sia nella richiesta di brevetti tecnici. I modelli costituirono la pratica più diffusa nelle due regioni industriali più avanzate dell'epoca, l'Italia centrosettentrionale e la Germania meridionale, fino alla metà del XVI secolo, ma in seguito iniziarono a essere usati anche in Spagna e Francia. Nei primi decenni del XVI secolo un artigiano di Norimberga realizzò un «grazioso progetto in legno per il re d'Inghilterra, lungo circa un *Ellen*, in cui una ruota ad acqua azionava meccanismi per la macinazione, l'affilatura, la lucidatura e il riempimento», anche se in questo caso può essersi trattato di un articolo per la collezione privata del re<sup>29</sup>; la prima traccia documentata di modelli tridimensionali per la costruzione navale in Inghilterra risale agli inizi del XVIII secolo, e l'ufficio brevetti inglese rese obbligatoria la presentazione di un modello operativo per le invenzioni meccaniche solo a partire dal 1720 circa<sup>30</sup>.

**3.3. La sperimentazione.** Nonostante l'utilizzo documentato di macchine come modelli a partire dal 1300, abbiamo solamente riscontri irregolari, e rara-

<sup>26</sup> F.d.G. Martini, *Trattati di architettura ingegneria e arte militare*, Milano, II Polifilo, 1967, pp. 1, e 142.

<sup>27</sup> B.C. Blake-Coleman, *Copper wire and electrical conductors. The shaping of a technology*, Chur, Harwood Academic Publishers, 1992.

<sup>28</sup> M. Popplow, *Models of machines: a «missing link» between early modern engineering and mechanics?*, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte Preprints, 2002, p. 225.

<sup>29</sup> Ivi, p. 1.

<sup>30</sup> Più o meno a partire dalla fine del XVI secolo, i modellini di macchine divennero sempre più un articolo per collezionisti in *Kunstkammern* e articoli per dimostrazioni mecca-

mente indiretti, relativi alla sperimentazione tecnica nell'Europa preindustriale; alcuni sono stati riportati nelle pagine precedenti, nell'ambito della discussione sulle pratiche costruttive. Prima del XVIII secolo, era evento di straordinaria rarità che gli inventori, gli stagnini e i semplici artigiani e ingegneri mettessero per iscritto in forma dettagliata le proprie attività (intese come altro rispetto alle proprie speculazioni, come per Leonardo). Tuttavia, due insoliti testi cinquecenteschi gettano in effetti luce su una serie di pratiche empiriche che in circostanze normali non lasciavano alcuna traccia materiale, ovvero il controllo chimico e il collaudo delle macchine.

La descrizione fatta da Giuseppe Ceredi, un ingegnere padovano, della sua invenzione (o riscoperta) della «vite idraulica» di Archimede, usata al fine di prosciugare bacini e di irrigare i terreni, contiene quello che potrebbe essere il primo suggerimento su carta stampata di come costruire modelli con caratteristiche diverse al fine di ricercare la soluzione ottimale per la costruzione di macchine. Ecco la descrizione di Ceredi:

Ho potuto fabricare quasi infiniti modelli piccoli e grandi, aggiungendo, mutando e levando molte cose secondo che o la conditione della materia, o il concorso di molte cagioni lontane, et vicine; o la varietà de' mezzi, od il grado delle proportioni, o la forza de' motori o molti altri impedimenti, che possono attraversarsi, lo ricercavano. Che si sa bene da quei scientiati, che pure una volta si sono dati all'operatione, che si numeroso e grande è il mucchio di quelle osservazioni, le quali tutte a un tratto bisogna avere nella fantasia per fare nascere qualche nuovo, e importante assetto, che quasi sempre è impossibile assettarle bene insieme, et indirizzarle sicuramente all'opera ordinata.

Avendo scoperto che non era possibile individuare regole uniformi che disciplinassero la costruzione ideale della vite idraulica, Ceredi si risolse a stabilire che la procedura migliore sarebbe stata utilizzare una vite di una lunghezza di circa otto metri, per sollevare acqua a un'altezza di circa cinque metri. Ceredi era consapevole dei problemi di scala relativi alle macchine e procedette di conseguenza. «Per renderla operativa – affermò – e far sì che sia saldamente basata sull'esperienza come indica la ragione, era necessario creare un gran numero di modelli, sia piccoli che grandi, ora con una certa lunghezza e altezza dei canali e ora con un'altra, in modo di essere in grado di proporzionare il tutto sul movente [l'elica] e sul suo organo [la manovella]».

niche nelle dimore private di ingegneri e nelle collezioni pubbliche di accademie scientifiche e istituti di ingegneria. Il collaudo basato su modelli fu centrale per l'opera di ingegneri del XVIII secolo come Christopher Polhem (1661-1751), Antoine de Parciewux (1703-1768) e John Smeaton (1724-1792). Negli stessi anni, con una curiosa inversione delle proprie origini nella pratica artigiana e ingegneristica, gli istituti tecnici in corso di riforma adottarono per breve tempo i modelli di macchine come mezzo per insegnare agli apprendisti le abilità artigiane senza somministrare loro una formazione su base artigiana.

733 *Trasferimento di conoscenza tecnologica in Europa (1200-1800)*

Piú o meno nella stessa epoca, il ceramista francese Bernard Palissy descrisse come, nell'arco di dieci anni, arrivò ad essere maestro nell'arte di combinare la qualità dell'argilla, lo spessore del vaso, il punto di fusione, il tipo, la qualità e i colori dello smalto, il livello e la costanza del fuoco e la posizione del vaso nel forno, per realizzare lo smalto secondo lo stile italiano (Fayence)<sup>31</sup>. Benché narrato secondo la forma e lo stile dei salvezionisti della Chiesa cristiana riformata, il racconto della lotta di Palissy per ottenere il controllo delle molte variabili nella lavorazione della ceramica suona veritiero nella misura in cui ci ricorda che nei processi chimici i modelli visuali e tridimensionali erano di poco aiuto. Si potevano ottenere risultati positivi soltanto attraverso un approccio al confine tra quello alchemico e quello della pratica artigiana; un altro esempio di questo approccio potrebbero essere i libri sistematici di ricette per la realizzazione di vetri veneziani, di cui esistono copie a partire dagli inizi del XVI secolo. Certo, è bello poter definire il «metodo scientifico» come «misurazione accurata, esperimento controllato e con un'enfasi sulla riproducibilità». Come notò Palissy, il problema di questa definizione ideale, alla quale in linea di principio aderiva, era sapere *cosa* misurare e *su cosa* sperimentare – questione che gli scienziati non furono in grado di meglio definire per quasi altri tre secoli. Le ricette furono perciò la soluzione, ma le ricette, al contrario delle macchine, erano difficili da tramandare, poiché il loro risultato dipendeva in larghissima misura da una combinazione di ingredienti materiali e condizioni atmosferiche e di altro tipo che non si potevano facilmente controllare, né, di conseguenza, riprodurre.

Nel complesso, i riscontri relativi ai processi euristici e alla codifica tecnica mostrano che le conoscenze artigiane e ingegneristiche dell'età preindustriale erano condivise o «distribuite» nell'ambito dei distretti industriali. Se ne può dedurre che anche la maggior parte delle invenzioni fossero condivise<sup>32</sup>. Tuttavia, la condivisione delle conoscenze avveniva con maggiore probabilità nella cantieristica navale e nell'edilizia, nel campo minerario e metallurgico, e nella produzione di orologi e strumenti scientifici, aree caratterizzate da una netta divisione del lavoro e da livelli avanzati di coordinamento, nelle quali la cooperazione offriva evidenti economie di scala e di flessibilità – settori che sono altresí importanti per aver giocato la parte tecnologicamente piú innovativa durante la rivoluzione industriale. È probabile che la condivisione sia stata meno intensa in settori come la produzione del vetro o di alcuni beni di lusso, dove la presenza di processi chimici dalle basi scarsamente note davano ad ogni singolo artigiano un margine competitivo.

<sup>31</sup> B. Palissy, *Oeuvres complètes*, Mont-de Marsan, Editions Interuniversitaires, 1996.

<sup>32</sup> R.C. Allen, *Collective invention*, in «Journal of Economic Behavior and Organization», IV, 1983, 1, pp. 1-24.

#### *4. Il trasferimento della conoscenza tecnologica nella dimensione spaziale*

4.1. *Testi e brevetti.* Fin qui ci siamo concentrati sul modo in cui la conoscenza tecnologica dell'epoca preindustriale veniva codificata e condivisa. Al fine di rispondere pienamente alla domanda iniziale, che riguardava le modalità secondo le quali l'innovazione tecnologica fu generata e sostenuta nell'epoca preindustriale, dobbiamo porci altresì il problema del modo in cui la conoscenza tecnologica viaggiasse.

In teoria, la conoscenza tecnologica poteva propagarsi nello spazio in tre diversi modi: attraverso testi disponibili al pubblico, attraverso i brevetti e attraverso individui migranti. Nella pratica, la conoscenza tecnologica incorporata e pubblicata non si diffondeva bene e, come concluse John Harris, che dedicò tutta la vita allo studio dei trasferimenti tecnologici fra l'Inghilterra e la Francia del XVIII secolo, «la natura artigianale di virtualmente quasi ogni tecnologia [...] significava che le descrizioni scritte e i disegni erano solo marginalmente utili»<sup>33</sup>.

Gli autori di testi tecnici dell'età preindustriale raramente si occupavano nella pratica di ciò di cui scrivevano, per questo motivo tendevano a sopravvalutare il peso della conoscenza esplicita e proposizionale nella pratica artigianale e ingegneristica. I manuali scritti erano incompleti e spesso fuorvianti; potevano contenere dettagli tecnici di fatto non utilizzati nel risolvere i problemi e lasciavano da parte alcuni «trucchetti» di cruciale importanza per la pratica. Tali problemi erano accentuati dalle difficoltà che gli esperti riscontravano nel descrivere le sfide che si trovavano ad affrontare e i fattori che contribuivano alle loro decisioni. Un'indagine sulla formazione dei nocchieri delle navi spagnole che dovevano salpare per le Indie giustificava la presunta incompetenza degli stessi nel modo seguente: «anche se una persona non è molto risoluta nell'agire seguendo la teoria, [nondimeno] la comprende bene, e colui che ha esperienza la comprende se agisce correttamente, e *ci sono molti che non sanno come proporre o spiegare l'utilizzo di uno strumento, ma avendone uno per le mani sanno usarlo molto bene*»<sup>34</sup>. L'ampia componente tacita e non lineare della conoscenza basata sull'esperienza spiega perché esperti di pari abilità nello stesso campo si trovassero in disaccordo su come eseguire il proprio lavoro<sup>35</sup>, e perché neanche una delle innovazioni dell'età preindustriale sia stata trasmessa esclusivamente per iscritto.

<sup>33</sup> J.R. Harris, *Attempts to transfer English steel techniques to France in the eighteenth century*, in S. Marriner, ed., *Business and businessman: studies in business, economic and accounting history*, Liverpool, Liverpool University Press, 1978, p. 549.

<sup>34</sup> A.D. Sandman, *Cosmographers vs. pilots: navigation, cosmography, and the state in early modern Spain*, Unpublished Ph.D., Madison, University of Wisconsin Madison, 2001, p. 276.

<sup>35</sup> E.H. Ash, *A perfect and an absolute work. Expertise, authority, and the rebuilding of Dover harbour, 1579-1583*, in «Technology and Culture», XLI, 2000, 2, pp. 239-268.

735 *Trasferimento di conoscenza tecnologica in Europa (1200-1800)*

I manuali e i trattati di architettura più diffusi e più sofisticati venivano consultati più riguardo a questioni formali, che per quel che riguardava le tecniche di costruzione. Nel più famoso e ampiamente copiato dei trattati, quello di Andrea Palladio (pubblicato nel 1570), le parti lignee erano disegnate col metodo delle proiezioni ortogonali e avrebbero pertanto potuto mettere gli architetti nelle condizioni di studiare le proporzioni di costruzione; tuttavia davano poche indicazioni sui metodi costruttivi o sull'uso dei materiali, poiché il Palladio, come anche altri autori di trattati, partiva dal presupposto che gli architetti e i costruttori avrebbero adattato i suoi progetti alle tradizioni edilizie locali e alla disponibilità di materiali<sup>36</sup>. Parte del successo del trattato del Palladio derivò proprio da questa intrinseca flessibilità. Per contro, molti lettori avrebbero trovato le informazioni tecniche sulla costruzione difficili da decifrare esclusivamente in base alle illustrazioni. L'architetto inglese Inigo Jones, per esempio, apprese i principi alla base del *design* degli ordini e i problemi di progettazione fondamentali per l'architettura del proprio paese per proprio conto; ma poiché non aveva ricevuto una formazione da muratore o carpentiere, ebbe bisogno di parlare con operai e architetti per poter apprendere le tecniche di costruzione. Fra il 1613 e il 1614 si recò in Italia proprio a questo scopo; in un colloquio con l'architetto Vincenzo Scamozzi, Jones gli chiese aiuto per gli aspetti tecnici delle volte e annotò nel suo diario: «Venerdì primo agosto 1614 conversai con Scamozo di tale questione ed egli mi illuminò sul tema delle volte».

I brevetti di epoca preindustriale presentavano problemi cognitivi e tecnici simili a quelli appena descritti. Una legge sui brevetti fu promulgata per la prima volta a Venezia nel 1474 e trovò rapidamente applicazione come legge vera e propria o come pratica legale nel resto dell'Italia e più a Nord, prima nei territori tedeschi, poi in Francia, Spagna e Paesi Bassi, e successivamente in Inghilterra<sup>37</sup>. In epoca preindustriale, tuttavia, le leggi sui brevetti, a differenza di quelle attuali, non ponevano come requisito la novità e l'originalità; la maggior parte delle descrizioni di brevetti erano generiche e non si avvicinavano neanche lontanamente a una moderna cianografia, e prima del XVIII secolo raramente le innovazioni venivano esaminate in modo sistematico. Anche se alcune amministrazioni (per esempio Venezia agli inizi del XVI secolo) richiedevano un modello operativo delle macchine da brevettare, gli inventori che preparavano i modelli spesso non erano in grado di superare i problemi di scala quando lavoravano su macchine di dimensioni reali, come notò

<sup>36</sup> L. Trogu Rohrich, *Le tecniche di costruzione nei trattati di architettura*, Monfalcone (Gorizia), Edicom, 1999.

<sup>37</sup> M. Frumkin, *Early history of patents for invention*, in «Transactions of the Newcomen Society», XXVI, 1947-49, pp. 26, 48, 56.

Giuseppe Ceredi nel 1567<sup>38</sup>. I problemi nascevano in particolar modo per invenzioni meccaniche di larga scala legate alla generazione di energia (mulini, idraulica, riscaldamento). Nella pratica, i brevetti erano un modo da parte delle città o dei governanti per incoraggiare l'introduzione di una nuova macchina o di un nuovo processo nella propria giurisdizione, concedendo un monopolio contingente sull'utilizzo dell'invenzione stessa. I brevetti erano anche usati come strumento di pubblicità commerciale. Dal momento che di norma i brevetti richiedevano alti costi per operazioni di *lobbying* e tasse, e poiché l'intero peso della dimostrazione e il rischio d'investimento ricadevano sulle spalle dell'inventore, le barriere d'accesso al mercato tecnologico *via brevetti* erano piuttosto alte. Anche altri fattori influivano sul grado di propensione alla registrazione di brevetti. Molte innovazioni di prodotto o di processo non furono mai brevettate perché erano meglio protette come segreti commerciali o perché facevano parte del sapere collettivo di un certo mestiere; per esempio, i produttori di orologi da polso e da parete e di strumenti astronomici e scientifici vari, la maggior parte dei quali era organizzata in corporazioni, si opponevano ai brevetti, che cercavano di privatizzare un sapere che già era patrimonio condiviso del mestiere, o che erano percepiti come una restrizione al commercio<sup>39</sup>. Di conseguenza, non sembra che i diritti legati ai brevetti del periodo preindustriale prima del 1800 abbiano avuto un ruolo fondamentale nell'innovazione<sup>40</sup>.

La tesi secondo la quale i diritti di brevetto relativi alle invenzioni furono necessari per l'innovazione tecnologica preindustriale si fonda sul presupposto che la creazione intellettuale sia non competitiva e che una volta di pubblico dominio, possa essere copiata senza ulteriori costi. Questo può anche essere vero, ma è irrilevante dal punto di vista economico: ciò che importa infatti è l'applicazione della nuova idea, applicazione che ha costi sia di apprendimento sia fisici. Nelle manifatture dell'età preindustriale, i costi di applicazione derivavano dalla natura in larga misura implicita della conoscenza tecnologica, fatto che creava l'esigenza di una formazione *one-to-one*, maestro-allievo, e significava che le innovazioni tecnologiche dovevano essere trasferite da artigiani e ingegneri in movimento.

<sup>38</sup> G. Ceredi, *Tre discorsi sopra il modo di alzare acque da luoghi diversi*, Parma, Seth Viotti, 1567, p. 52; S. Drake, *An agricultural economist of the late Renaissance*, in B.S. Hall, D.C. West, eds, *On pre-modern technology and science. A volume of studies in honor of Lynn Whyte, jr.*, Malibu, Undena Publications, 1976, pp. 53-73.

<sup>39</sup> S.R. Epstein, M. Prak, eds, *Guilds, technology and economy in Europe 1400-1800*, London, Routledge, 2008.

<sup>40</sup> C. Mac Leod, *Accident or design? George Ravenscroft's patent and the introduction of lead-crystal glass*, in «Technology and Culture», XVIII, 1987, 4, pp. 776-803; Id., *Inventing the Industrial Revolution. The English patent system, 1660-1800*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988; L. Molà, *Il mercato delle innovazioni nell'Italia del*

4.2. *Il trasferimento di tecnici qualificati.* Nella pratica, il trasferimento tecnologico poteva avvenire con successo soltanto attraverso la mobilità degli individui. Tuttavia, il buon esito del trasferimento si trovava a scontrarsi con quattro ostacoli. I due citati con maggior frequenza, il desiderio di proteggere i segreti del settore e l'opposizione da parte delle corporazioni, furono anche i meno importanti.

Come ha reso chiaro la precedente discussione relativa all'euristica tecnica, la maggior parte dei cosiddetti mestieri artigiani erano di fatto aperti a chiunque fosse desideroso di formarsi in quella specifica arte o pratica ingegneristica. Per esempio, benché si dica generalmente che i principi geometrici «gotici» per disegnare le elevazioni – principi sviluppati intorno a Parigi tra la metà del XII e la metà del XIII secolo – rappresentassero il «segreto» custodito con maggior gelosia dagli addetti al settore, in realtà erano condivisi da qualsiasi muratore regolarmente formatosi a Nord delle Alpi. L'applicazione dei principi gotici era semplicemente una pratica che distingueva i muratori che avevano ricevuto formazione da chiunque altro, e non vi è alcuna prova dell'esistenza di un esclusivismo tecnico<sup>41</sup>. Similmente, il carattere «distribuito» della conoscenza tecnologica – istituzionalizzata tramite l'apprendistato, la pratica corporativa e la divisione del lavoro, oltre che grazie alla circolazione sistematica della manodopera – aveva come conseguenza il fatto che i segreti tecnici, se ritenuti utili, erano difficili da mantenere.

La credenza che i mestieri artigiani fossero particolarmente inclini alla segretezza e all'esclusivismo sembra avere avuto origine durante il XVII secolo fra i «nuovi scienziati» e gli adepti della filosofia naturale. Affascinati dalla provata conoscenza empirica dei tecnici del mondo materiale, gli intellettuali di orientamento empirico tra il tardo XV (Leonardo) e il primo XVII secolo (Bacone, Galileo, Cartesio) scrissero con ammirazione delle pratiche e delle conoscenze artigiane. Ma la loro ammirazione era permeata di sospetto, nutrita da tre distinti elementi. Innanzitutto, essi, senza pratica estensiva, non riuscivano a comprendere la conoscenza tecnologica e, non essendo consapevoli delle logiche cognitive alla base di essa, trovavano difficile credere che tecnici analfabeti o quasi analfabeti potessero saperne più di loro riguardo alla natura. Di conseguenza, per esempio, le relazioni della Royal Society sugli esperimenti non riportavano mai i nomi dei tecnici che avevano di fatto creato e mantenuto in efficienza la strumentazione ed ese-

*Rinascimento*, in M. Arnoux, P. Monnet, éd. par, *Le technicien dans la cité en Europe occidentale, 1250-1650*, Rome, Ecole française de Rome, 2004, pp. 215-250.

<sup>41</sup> L.R. Shelby, *The «secret» of the medieval masons*, in B.S. Hall, D.C. West, *On pre-modern technology and science*, cit., pp. 201-222; E. Fernie, *A beginner's guide to the study of architectural proportions and systems of length*, in E. Fernie, P. Crossley, eds, *Medieval architecture and its intellectual context. Studies in honour of Peter Kidson*, London-Ronceverte, Hambleton Press, 1990, pp. 229-238.

guito l'esperimento<sup>42</sup>. In secondo luogo, i fautori della nuova scienza volevano prendere a tutti i costi le distanze dalla ben radicata tradizione alchemica, che assocavano, in maniera non del tutto giustificabile, a un forte desiderio di segretezza e a forme di esclusivismo sociale e tecnico<sup>43</sup>. Sotto questo profilo, gli scienziati nuovi seguivano la tradizione della Scolastica, secondo la quale «la conoscenza dei segreti [alchemici] era *stricto sensu* impossibile: se ne poteva far esperienza, e si potevano scoprire “sperimentalmente”, ma non potevano essere compresi o spiegati secondo i canoni della logica o della filosofia naturale»<sup>44</sup>. Durante il XVI secolo alchimisti come Paracelso, Girolamo Cardano e Andreas Libavius associarono intenzionalmente le loro pratiche alle attività e ai metodi artigiani al fine di sottolineare il loro approccio empirico e non scolastico. Gli scienziati nuovi del XVII secolo si ritrovarono perciò fra le mani una cornice concettuale già pronta, che sottolineava la segretezza e l'inaffidabilità, nella quale incasellare le pratiche artigiane, e che per di più metteva in luce, per contrasto, l'apertura intellettuale professata dagli scienziati.

Il terzo elemento, nella teoria emergente sulla pratica artigiana, sorse dalla preoccupazione, da parte dei nuovi scienziati, di fondare un metodo facilmente trasportabile, il cui obiettivo principale era codificare i fatti del mondo naturale in un linguaggio universale. Ciò li metteva esplicitamente in contrasto con i tecnici, che essi descrivevano come persone senza alcun metodo. Come abbiamo visto, si trattava di fatto di una mistificazione, dal momento che la codifica era per i tecnici un'attività altrettanto importante che per gli scienziati, benché con obiettivi differenti: per i tecnici, la codifica era un mezzo per creare cose che funzionassero, più che un fine di per sé.

Affermare che le corporazioni si opponessero sistematicamente all'innovazione proveniente dall'esterno è ugualmente discutibile. In primo luogo, si tratta di un'affermazione eccessivamente generica. Se si intende sostenere che le corporazioni non innovassero mai, ciò è dimostrabile come falso<sup>45</sup>; un recen-

<sup>42</sup> S. Shapin, *The house of experiment in seventeenth-century England*, in «Isis», 1988, 79, pp. 373-404.

<sup>43</sup> W.R. Newman, *Alchemical and Baconian views on the art/nature division*, in A.G. Debus, M.T. Walton, eds, *Reading the book of nature. The other side of the Scientific Revolution*, Kirksville (MI), Truman State University, 1998, pp. 81-90; Id., *Alchemical symbolism and concealment: the chemical house of Libavius*, in P. Galison, E. Thomson, eds, *The architecture of science*, Cambridge (Mass.)-London, The Mit Press, 1999, pp. 59-78.

<sup>44</sup> W. Eamon, *Science and the secrets of nature. Books of secrets in medieval and early modern culture*, Princeton, Princeton University Press, 1994, p. 53.

<sup>45</sup> S.R. Epstein, *Craft guilds, apprenticeship and technological change in pre-industrial Europe*, cit.; Id., *Guilds*, in J. Mokyr, ed., *The Oxford encyclopedia of economic history*, Oxford, Oxford University Press, 2003; S.R. Epstein, M. Prak, eds, *Guilds, technology and economy in Europe*, cit.

te studio sulla brevettistica nell'Italia del XVI secolo dimostra che le corporazioni erano all'avanguardia nel collaudo e nell'introduzione di innovazioni tecniche<sup>46</sup>. Se, d'altro canto, con tale affermazione si intende sostenere che ad un certo punto le corporazioni sarebbero divenute tecnicamente conservatrici, essa perde tutto il suo valore predittivo. L'argomentazione è inoltre ingenua da un punto di vista metodologico. Benché la documentazione parta dal presupposto che tutte le innovazioni rifiutate fossero migliori della pratica in uso, essa raramente rivela se l'opposizione da parte delle corporazioni fosse dettata dall'esercizio del diritto alla rendita o da un'oggettiva valutazione dei meriti dell'innovazione.

Casi singoli di resistenza al cambiamento ci dicono poco riguardo i rapporti tra le corporazioni e il progresso tecnologico in generale. Una teoria sull'innovazione nelle corporazioni deve identificare i criteri, sia tecnici sia politici, che dettavano la scelta della tecnologia e stabilivano un determinato percorso tecnologico. In linea di principio, ci si aspetterebbe che i mestieri artigiani privilegiassero fattori che potenziavano le abilità e risparmiavano capitale. Nonostante l'assenza di ricerche sistematiche, i riscontri dai registri dei brevetti indicano che questo era esattamente il tipo di innovazione prevalente in Inghilterra prima della metà o del tardo XVIII secolo, quando le corporazioni del paese erano ancora molto attive. Tra il 1660 e il 1799, le innovazioni *labor saving* rappresentavano meno del 20% del totale, mentre quelle *capital saving* (soprattutto capitale attivo) e migliorative della qualità rappresentavano più del 60%. Non vi è ragione di credere che nel resto d'Europa questi dati fossero molto diversi<sup>47</sup>.

La risposta all'innovazione da parte di ciascun mestiere dipendeva in primo luogo da forze politiche, piuttosto che di mercato. Vi era una fondamentale differenza di prospettiva fra l'artigiano più povero, che aveva bassi investimenti di capitale e traeva la principale fonte di reddito dalle proprie abilità, e che perciò (spesso alleandosi con i manovali semplici) si opponeva alle innovazioni *capital-intensive* e *labor-saving*, e gli artigiani più abbienti, più propensi a simili cambiamenti. La decisione di innovare era inoltre condizionata dalle relazioni fra gli organi di governo delle corporazioni e lo Stato. Da un lato, i mastri artigiani più ricchi e più innovatori avevano maggiori possibilità di influenzare le politiche del governo, e in circostanze normali sembra che le autorità permettessero loro di aggirare i regolamenti corporativi. Dall'altro, tuttavia, se le innovazioni *labor-saving* coincidevano con un momento di grave recessione economica, le municipalità erano più propense ad andare in-

<sup>46</sup> L. Molà, *Il mercato delle innovazioni nell'Italia del Rinascimento*, cit.

<sup>47</sup> C. MacLeod, *Inventing the Industrial Revolution*, cit., cap. 9; T.P. Griffiths, A. Hunt, P.K. O'Brien, *Inventive activity in the British textile industry, 1700-1800*, in «Journal of Economic History», LII, 1992, 4, pp. 881-906, pp. 892-895.

contro alle preoccupazioni dei mastri artigiani minori, sia per assicurare la stabilità politica e sociale, che per evitare che gli artigiani disoccupati lasciassero il paese. In altre parole, era più probabile che le corporazioni agissero come «cartelli di recessione» quando le circostanze economiche volgevano al peggio, pur necessitando ugualmente di sostegno politico per far rispettare con successo le restrizioni di cartello contro opportunisti (*free riders*) e contro le corporazioni rivali. Fu così, per esempio, che le corporazioni olandesi entrarono in una lunga fase di stagnazione dopo la metà del XVII secolo – ma solo dopo aver ottenuto l'approvazione municipale<sup>48</sup>.

Anche se la maggior parte della conoscenza tecnologica rimase o non formulata o non registrata, non bisogna confondere la scarsità di testi scritti che dettaglino la pratica tecnica con un imprescindibile voto dei tecnici alla segretezza. Piuttosto, l'assenza di testi dimostra che la scrittura (incluso, sotto diversi profili, il disegno) era un metodo di trasmissione altamente inefficace. Come suggerisce il lavoro del Palladio, la conoscenza utile o basata sull'esperienza – la conoscenza che funziona – è, in linea di principio, locale. Questo non significa che sia necessariamente segreta, o che rimanga racchiusa nella mente di un individuo: la conoscenza tecnologica preindustriale era ampiamente socializzata e condivisa. Alcuni elementi della conoscenza basata sull'esperienza – nella cantieristica navale e, in misura minore, nell'edilizia – erano sempre più spesso codificati per iscritto. Un risultato parziale della codifica scritta fu quello di rendere la conoscenza locale *meno* locale, accessibile sia alla categoria professionale emergente dei progettisti, sia, in linea di principio, ai costruttori non appartenenti alla comunità di origine dei depositari di quel sapere. Un'altra parte della conoscenza basata sull'esperienza restava, per così dire, incorporata negli oggetti, e gli oggetti potevano viaggiare ed essere osservati: le navi potevano essere viste, gli orologi smontati, la porcellana d'importazione cinese poteva dimostrare che qualcosa che era ritenuto impossibile, o sconosciuto, era di fatto realizzabile.

Una chiara prova dell'efficacia del trasferimento tecnologico attraverso la migrazione è data dall'affermazione, discussa nelle pagine precedenti, che la *leadership* tecnologica si sia spostata nel corso del tempo dall'Europa meridionale a quella nordoccidentale – dall'Italia (1200-1450), al bacino meridionale del Reno e ai Paesi Bassi del Sud (1450-1570 circa), alla Repubblica olandese (1570-1675) e infine all'Inghilterra, a partire all'incirca dal 1675 – soprattutto grazie a individui qualificati formati dalle corporazioni o da altre comunità di tecnici specializzati (minatori, muratori, costruttori navali, ecc.).

<sup>48</sup> J. de Vries, A. van der Woude, *The first modern economy. Success, failure, and perseverance of the Dutch economy, 1500-1815*, Cambridge, Cambridge University Press, 1997, pp. 294, 340-341, 582; R.W. Unger, *Dutch shipbuilding before 1800. Ships and guilds*, Assen-Amsterdam, Van Gorcum, 1978, cap. 5.

#### 741 Trasferimento di conoscenza tecnologica in Europa (1200-1800)

Tra il 1300 e il 1550, le corporazioni artigiane europee e le amministrazioni cittadine misero a punto procedure istituzionali mirate a sostenere la mobilità artigiana e innalzare il tasso potenziale di innovazione tecnologica. Gli operai specializzati che migravano erano costituiti principalmente da apprendisti o lavoratori a giornata, che si spostavano su base stagionale, oppure da maestri affermati, le cui migrazioni tendevano ad essere permanenti. La mobilità organizzata di apprendisti e operai a giornata era originata da temporanee carenze di lavoratori qualificati, a seguito delle epidemie di peste degli anni 1348-50. Intorno al 1550, il vagabondaggio era diffuso in gran parte dell'Europa occidentale, anche se fu completamente istituzionalizzato soltanto nell'Europa centrale di lingua tedesca e, in maniera meno estensiva, in Francia. In Inghilterra, le organizzazioni di lavoratori a giornata indipendenti si formarono dopo il declino di Londra come centro di formazione nazionale, a partire dagli anni Ottanta del Seicento. Dal momento che l'obiettivo principale del vagabondaggio organizzato era quello di poter coordinare le informazioni e allocare in maniera più efficace la manodopera qualificata nelle varie regioni, non sorsero mai organizzazioni formali nelle regioni a densa urbanizzazione come l'Italia settentrionale o i Paesi Bassi, dove i costi di informazione erano bassi<sup>49</sup>.

La mobilità di apprendisti e operai a giornata contribuì a sviluppare e diffondere la conoscenza tecnologica all'interno di aree simili da un punto di vista istituzionale, economico e culturale. Le nascenti monarchie e gli Stati territoriali, per contro, si prefiggevano di attrarre nuove abilità e nuova tecnologia dall'esterno. La competizione per accaparrarsi lavoratori qualificati, come per esempio i maestri costruttori di cattedrali, esisteva già durante il Medioevo, ma crebbe notevolmente, nel primo Rinascimento (1450-1500 circa), nel Mediterraneo occidentale e, dopo la Riforma, anche nell'Europa centrosettentrionale, quando i governanti europei si prefissero di attrarre artigiani fuoriusciti dalle terre nemiche. Le migrazioni di ugonotti a Ginevra e in Inghilterra, così come il trasferimento in blocco di abilità artigiane dal Brabante all'Olanda dopo il sacco di Anversa del 1585, costituiscono solo alcuni fili della complessa ragnatela con cui è possibile rappresentare la diffusione del sapere tecnologico dettata da ragioni politiche<sup>50</sup>. A partire dalla metà del XVII secolo, gli Stati mercantilistici favorirono l'industria interna e fecero ricorso allo spionaggio industriale in maniera più che mai sistematica, mentre i ten-

<sup>49</sup> S.R. Epstein, *Labour mobility, journeyman organisations and markets in skilled labour in Europe, 14<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> centuries*, in L. Hilaire-Perez, A. Garçon, éd. par, *Pratiques historiques de l'innovation, historicité de l'économie des savoirs (12<sup>e</sup>-19<sup>e</sup> siècles)*, Paris, 2004; D.E. Wildasin, *Labor-market integration, investment in risky human capital, and fiscal competition*, in «American Economic Review», XC, 2000, 1, pp. 73-95.

<sup>50</sup> W.C. Scoville, *Minority migrations and the diffusion of technology*, in «Journal of Economic History», XI, 1953, 3, pp. 347-360.

tativi delle corporazioni e delle autorità politiche volti a porre un freno alle migrazioni di lavoratori qualificati furono intralciati da amministrazioni deboli e dalla competizione tra gli Stati<sup>51</sup>.

Ogni volta che la fiaccola tecnologica si riaccendeva, l'area divenuta nuovo *leader* regionale veniva percorsa da un moto di rapida innovazione. La Gran Bretagna, per esempio, fu un paese tecnologicamente in debito fino al tardo XVII secolo; tra il 1600 e il 1675 importò dal continente le più avanzate tecniche di fusione e forgiatura dei metalli, produzione di vetro, ceramica, armi da fuoco e orologi, strumenti scientifici, lana, tessuti di lino e di seta, così come tecniche agricole e di ingegneria idraulica<sup>52</sup>. Questa posizione di dipendenza iniziò a capovolgersi a partire dal 1675 circa, e già nel 1720 il Parlamento inglese aveva cominciato a preoccuparsi della concorrenza internazionale e a sentirsi sicuro della maestria dei propri tecnici al punto da approvare una legge che vietava l'emigrazione dei tecnici residenti sul territorio nazionale.

I due principali ostacoli al trasferimento di tecnologia furono, perciò, i costi di informazione e di trasporto, che riducevano la mobilità della manodopera, e l'assenza di una base di abilità locali che permetesse di applicare con successo le nuove tecniche in arrivo. L'innovazione esogena poteva essere assorbita soltanto qualora vi fosse un'adeguata offerta di tecnici ben formati, in grado di creare, far funzionare e riparare i nuovi macchinari; nel XVIII secolo, per esempio, uno degli ostacoli maggiori incontrati nel trasferire le tecnologie inglesi – basate sul carbone – alle economie continentali – non basate sul carbone – fu costituito dall'incompatibilità dei rispettivi beni intermedi, parti e abilità<sup>53</sup>. La trasmissione delle conoscenze più aggiornate poteva pertanto risultare mostruosamente lenta. Fu per esempio necessario più di un secolo per trasferire il «cilindro olandese» dall'Olanda del XVII secolo alla Francia del XVIII, lentezza dovuta alla mancanza di bravi tecnici addetti alla costruzione e riparazione dei macchinari; allo stesso modo, i metalmeccanici francesi del XVIII secolo non conoscevano la siderurgia di alta qualità che già da due secoli era in uso in Germania, Italia settentrionale, Svezia e Inghilterra<sup>54</sup>.

<sup>51</sup> J.R. Harris, *Essays in industry and technology in the eighteenth century: England and France*, Hampshire-Brookfield, Ashgate, 1992.

<sup>52</sup> G. Hollister-Short, *Leads and lags in late seventeenth-century English technology*, in «History of Technology», I, 1976, pp. 159-183.

<sup>53</sup> J.R. Harris, *Attempts to transfer English steel techniques to France*, cit.

<sup>54</sup> L.N. Rosenband, *Papermaking in eighteenth-century France. Management, labor, and revolution at the Montgolfier Mill 1761-1805*, Baltimore-London, The Johns Hopkins University Press, 2000; C.S. Smith, *Introduction*, in A. Grünhaldt Sisco, ed., *Reamur's memoirs on steel and iron. A translation from the original printed in 1722*, Chicago, University of Chicago Press, 1956, pp. VII-XXXIV.

Gli ostacoli al trasferimento delle tecniche si ridussero, nel corso del tempo, grazie al calo dei costi di informazione e di trasporto, cosa che può accuratamente e ragionevolmente trovare riscontro nei processi relativi all'urbanizzazione e all'integrazione dei mercati finanziari e di vario genere<sup>55</sup>. L'esempio più saliente della correlazione tra *leadership* tecnologica e urbanizzazione è costituito dall'Inghilterra preindustriale, che tra il 1650 e il 1750 si trasformò da semiperiferia tecnologica e sottourbanizzata al paese più tecnologicamente innovativo e urbanizzato d'Occidente. Le ragioni più plausibili di questa correlazione sono quelle classiche di matrice marshalliana: le città economicamente floride attraggono lavoratori qualificati, la cui presenza stimola la crescita dei settori specializzati di beni intermedi; gli *spillovers* di conoscenza fra imprese aumentano, e le conoscenze affidabili migliorano e aumentano con l'uso. Questo modello tende a confermare i riscontri esistenti, che sembrano indicare che in età preindustriale la *leadership* tecnologica regionale seguisse alla *leadership* commerciale, con un certo scarto temporale<sup>56</sup>.

5. *Conclusioni.* Nonostante la scarsità di prove documentate, le prove derivanti dalla pratica tecnologica sembrano suggerire che la conoscenza tecnologica non scientifica dell'età preindustriale espresse livelli significativi di astrazione, sperimentazione e accumulazione. Esistono inoltre prove convincenti del fatto che i tecnici preindustriali codificarono regole euristiche in risposta alla crescente richiesta di standardizzazione e all'incremento della mobilità degli operai specializzati. Queste conclusioni mettono in discussione la distinzione recentemente delineata da Mokyr tra conoscenza «propositiva» e conoscenza «prescrittiva»<sup>57</sup>.

Il progresso tecnologico preindustriale fu stimolato e al tempo stesso limitato dal modo in cui la conoscenza tecnologica generica era codificata e dalla «collective invention»<sup>58</sup>. La codifica tecnica in età preindustriale si scontrava con tre importanti limiti cognitivi, che aveva in comune con la filosofia naturale dell'epoca. Innanzitutto, i tecnici preindustriali, così come i filosofi na-

<sup>55</sup> P. Bairoch, J. Batou, P. Chevre, *La population des villes européennes 800-1850. Banque de données et analyse sommaire des résultats*, Genève, Librairie Droz, 1988; S.R. Epstein, *Town and country in Europe, 1300-1800*, in S.R. Epstein, ed., *Town and country in Europe between the fourteenth and the eighteenth centuries*, Cambridge, Cambridge University Press, 2001, pp. 1-29; L. Neal, *How it all began: the monetary and financial architecture of Europe from 1648 to 1815*, in «Financial History Review», VII, 2000, 2, pp. 117-140; K.G. Persson, *Grain markets in Europe, 1500-1900. Integration and deregulation*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

<sup>56</sup> K.A. Davids, *Shifts of technological leadership in early modern Europe*, cit.

<sup>57</sup> J. Mokyr, *The gifts of Athena*, cit.

<sup>58</sup> R.C. Allen, *Collective invention*, cit.; S.R. Epstein, *Labour mobility, journeyman organisations and markets in skilled labour in Europe, 14<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> centuries*, cit.

turali del XVII e XVIII secolo e le loro controparti contemporanee, si scontravano con il fatto che la conoscenza tacita – sia quella esprimibile sia quella inesprimibile attraverso il linguaggio naturale – è presente in ogni luogo ed è inevitabile; perciò la codifica scritta era, per definizione, sempre incompleta. Il secondo ostacolo, in cui si imbattevano i tecnici preindustriali e anche i filosofi naturali, era il fatto che alcune forme di conoscenza erano, rispetto ad altre, più facili da codificare e da trasferire tramite proporzioni e rapporti, diagrammi, modelli e «ricette». Per questo motivo la conoscenza tecnologica relativa alla metallurgia e alla chimica era più difficile da trasferire, in quanto il carattere e la qualità degli *inputs* presentavano margini di variabilità maggiori, e il prodotto finale non poteva essere oggetto di *reverse engineering* che rivelasse i processi produttivi ad esso sottostanti. Infine, l'empirismo della tecnologia preindustriale rendeva difficile per i tecnici operare una chiara distinzione fra struttura teorica e forma; una simile difficoltà può spiegare l'inabilità, da parte di molta filosofia naturale dell'età preindustriale, di generare una scienza tecnologicamente fruibile. I tecnici estrapolavano la conoscenza basata sull'esperienza dall'osservazione empirica di ciò che funzionava data una serie di circostanze materiali e di pratiche. Le codifiche che riuscivano a produrre erano di seconda classe, ricche cioè di informazioni e in grado di cogliere un alto livello di *variance* nelle informazioni, ma altresì dotate di un potere predittivo limitato. Anche se le pratiche e gli algoritmi basati su di esse contribuirono a un'ampia gamma di miglioramenti tecnologici, essi fornivano poche informazioni su come un insieme di regole con premesse differenti avrebbe influenzato un procedimento tecnologico già noto. In altre parole, ogni insieme di regole era corredata dalla sua dotazione di pratiche corrispondenti.

In linea di principio, la distinzione debole fra struttura e forma – tra regole e pratica – che abbiamo visto all'opera nella costruzione di cattedrali e di navi, faceva salire i costi del passaggio da un insieme di regole a un altro. In pratica, tuttavia, queste limitazioni erano meno gravi di quelle derivanti dalle restrizioni ai flussi di informazione, dal momento che non vi è ragione di credere che la maggior parte delle tecnologie preindustriali, basate sulle pratiche empiriche e sui materiali disponibili, avesse già raggiunto la propria frontiera tecnologica prima del 1800. Le restrizioni più severe all'affidabilità della tecnologia e all'innovazione di età preindustriale derivavano dagli alti costi di informazione e riproduzione connessi alle conoscenze basate sull'esperienza. Sembra che la fonte principale del calo dei ritorni della conoscenza tecnologica siano stati i costi di comunicazione tra artigiani e ingegneri sparsi geograficamente qua e là, piuttosto che l'atteggiamento di chiusura generalmente ascritto alla base epistemica dei mestieri artigiani preindustriali.

Anche se in linea di principio la conoscenza tacita avrebbe dovuto far aumentare la possibilità di appropriarsi dei *rent streams* derivati dall'invenzione

## 745 Trasferimento di conoscenza tecnologica in Europa (1200-1800)

ne, in pratica la possibilità di tali appropriazioni era piuttosto bassa, poiché il sistema di formazione tramite apprendistato e l'utilizzo di una forza lavoro qualificata mobile rendeva difficile per gli individui proteggere i segreti tecnici. Dal momento che le concessioni di brevetti e le leggi in merito erano diffuse, ma inefficaci, e presentavano alte barriere economiche di ingresso, gli incentivi all'innovazione su base individuale erano piuttosto deboli. La maggior parte della conoscenza tecnologica all'interno delle regioni o dei distretti industriali, che possedevano mercati del lavoro qualificato integrati, era di tipo condiviso, ma il trasferimento tecnologico su lunga distanza era intrinsecamente competitivo, poiché per essere applicato con successo richiedeva modalità di *expertise* su base non locale.

A partire dall'XI secolo emerse un sistema tecnologico distintamente europeo, basato sulla formazione tramite apprendistato in ambito artigiano, sull'adesione non ascrittiva alle associazioni artigiane e, in misura sempre crescente, sulla competizione fra Stati per accaparrarsi lavoratori qualificati. Questi tre elementi definirono una serie di condizioni endogene necessarie e sufficienti per l'accumulazione, la codifica e la circolazione di una conoscenza tecnologica affidabile<sup>59</sup>. Tuttavia, la principale fonte *diretta* di innovazione tecnologica preindustriale fu la corporazione artigiana, per tre motivi. Prima di tutto, essa faceva applicare le regole sull'apprendistato lottando contro lo sfruttamento e i *free-riders*. In secondo luogo, essa offriva supporto istituzionale, organizzativo e pratico ad apprendisti, muratori e maestri migranti che trasferivano la propria conoscenza tecnologica da una città o regione d'Europa a un'altra. Infine, al contrario del sistema dei brevetti, la corporazione offriva incentivi all'invenzione, facendo rispettare diritti di proprietà temporanea sulle innovazioni dei propri iscritti. È da sottolineare che soltanto il primo di questi elementi fu il risultato di una politica adottata deliberatamente; gli altri due furono conseguenze, non intenzionalmente ricercate, dei benefici che la corporazione offriva ai suoi membri.

La crescente urbanizzazione e la competizione fra Stati abbatterono i costi della disseminazione delle conoscenze tecnologiche nel corso del tempo. L'urbanizzazione offrì opportunità sempre maggiori per lo scambio di conoscenza, oltre a una miglior qualità della forza lavoro, una più alta probabilità di far combaciare le abilità disponibili con la domanda e incentivi più forti alla codifica delle conoscenze. Benché *a priori* non sia chiaro se sia stata l'alta urbanizzazione ad attrarre migranti qualificati, o se la migrazione (stimolata da fattori esogeni come la guerra) abbia provocato l'alta urbanizzazione, i riscontri sembrano indicare il prevalere dei primi fattori, del tipo «a traino», in

<sup>59</sup> S.R. Epstein, *The rise of the West*, in J. Hall, R. Schroeder, eds, *An anatomy of power: the social theory of Michael Mann*, Cambridge, Cambridge University Press, in corso di stampa.

maniera specifica per quel che riguarda il successo commerciale urbano. La migrazione di lavoratori qualificati permise ai nuovi *leaders* tecnologici di spostarsi rapidamente verso la frontiera tecnologica, ricombinare le conoscenze esterne con quelle locali e procedere a ulteriori innovazioni. È più probabile che l'accelerazione dell'innovazione tecnica nel XVIII secolo sia stata causata da tecnici sempre più mobili, che condividevano tra loro un tipo di conoscenza sia proposizionale che prescrittiva, che non da un «Illuminismo industriale» di origine intellettuale.

*traduzione di Valentina Fava*

*Stephan R. (Larry) Epstein (1960-2007), professore di storia economica alla London School of Economics, è morto inaspettatamente il 3 febbraio 2007 a Londra, all'età di 46 anni, appena un anno dopo lo svolgimento del seminario di cui si pubblicano qui gli atti. Come tante volte nel corso della sua carriera, il suo contributo al dibattito era stato eccezionale per la sua capacità critica e per lo sguardo rinnovatore verso il passato.*

*Laureato all'Università di Stena, qualche anno dopo aveva preso il dottorato a Cambridge con una tesi sul Regno di Sicilia nel XV secolo («An island for itself», Cambridge, 1992). Al momento della sua scomparsa era direttore del Dipartimento di storia economica della London School of Economics. Aveva dedicato i suoi primi lavori alla storia economica d'Italia nei secoli XIV e XV e già in questi lavori si possono trovare alcune di quelle che sarebbero state le chiavi del suo pensiero storico: la necessità di comprendere l'evoluzione economica nel contesto di fattori sociali e istituzionali; la lotta contro la trasposizione meccanica nel passato di idee semplicistiche tratte dal funzionamento dell'economia attuale, in particolare riguardo al mercato; la revisione di archetipi come quello riguardante il ruolo negativo che le corporazioni avrebbero svolto per il decollo industriale; l'interesse per il dialogo fra la storia e le teorie derivanti dalle scienze sociali; e così via. I suoi contributi alla storia d'Italia, che sono stati una presenza fondamentale fino ai suoi ultimi lavori, hanno contribuito a rinnovare le idee in maniera decisiva e preziosa. Ne offre un buon esempio la sua ultima monografia «Freedom and growth» (London, 2000), nella quale, partendo dall'analisi di diversi paesi, ma in particolare del caso italiano, si costruisce una teoria su come il processo di formazione dello Stato contribuisce alla crescita economica in età moderna. L'argomentazione è svolta a partire da alcuni dei concetti della nuova economia istituzionale, ma in maniera molto critica rispetto alle posizioni di D. North. La sua profonda conoscenza della storia d'Italia si riflette anche nella sua posizione critica nei confronti della sociologia storica dello Stato, e in particolare nelle sue divergenze da Michael Mann.*

*Il testo di Larry presentato qui in traduzione italiana è un altro buon esempio delle preoccupazioni che lo animarono durante la sua intensa e ricca vita intellettuale. Questi atti intendono essere un riconoscimento alla sua carriera e alla sua eredità intellettuale da parte di una serie di storici, molti dei quali del Sud Europa.*

*b.y.c.*