

La fusione delle artiglierie tra Medioevo e Rinascimento. “Cronaca” di un rinnovamento tecnologico attraverso i manoscritti di Leonardo

ANDREA BERNARDONI

Istituto e Museo di storia della Scienza, Firenze

L'affermazione delle armi da fuoco e la loro progressiva diffusione in tutti gli eserciti degli stati europei durante il XV secolo portò, nel secolo successivo, ad un rinnovamento radicale del modo di fare la guerra. Durante questo periodo le artiglierie stesse furono oggetto di continui miglioramenti tecnici sia metallurgici che balistici, oltre che a diversificazione nei tipi e nei calibri¹. Anche se sforzi di classificazione e razionalizzazione dei calibri sono testimoniati già nei manoscritti di Francesco di Giorgio e Leonardo, ancora nei primi anni trenta del XVI secolo l'ingegnere senese Vannoccio Biringuccio si lamentava della mancanza di linee guida per standardizzare le tipologie e i calibri delle artiglierie².

Esistono vari tipi di fonti che ci permettono di ricostruire la storia delle armi da fuoco, molte di natura iconografica che restituiscono immagini di assedi e di battaglie, come le splendide miniature delle *Cronache* di Jean Froissart³ e altre di carattere archivistico quali i contratti e gli inventari contenuti nei registri delle magistrature cittadine dai quali oltre al numero e alla tipologia di arma acquistata o fatta produrre apprendiamo a volte anche informazioni sui materiali e sulle tecniche impiegate⁴. È il caso del contratto stipulato nel 1326 dalla magistratura fiorentina con due artigiani per la realizzazione di due bombarde di bronzo nel quale troviamo la notizia più antica in nostro possesso sull'impiego di palle di ferro, anche se da esso è impossibile capire se si trattasse di palle realizzate alla fucina o per fusione⁵, cioè con una modalità di produzione tale da far pensare alla riproducibilità seriale, più probabile si trattasse di manufatti artigianali. Non sono stati, tuttavia, ancora trovati

¹ Il tema della diffusione delle artiglierie è vasto e complesso ed esula dai limiti di questo contributo che si concentra esclusivamente su tematiche tecnico-metallurgiche osservate attraverso i manoscritti di Leonardo. Per una trattazione specifica di questi temi si vedano: P. CONTAMINE, «L'artillerie royale française à la veille des guerres d'Italie», *Annales de Bretagne*, 71, 2, (1964), 221-261. C. M. CIPOLLA, *Vele e cannoni*, (Bologna: Il Mulino, 1999), 2^a ed italiana, E. de CROUY-CHANEL, *Canons Médiévaux, pousseance du feu*, (Parigi: Rempart, 2010).

² V. BIRINGUCCIO, *De la pyrotechnia*, (Venezia, per V. Roffinello, 1540, ed. in facsimile a cura di A. Carugo, Bologna, Il Polifilo, 1977), cc. 78v-80v. L'opera di Biringuccio è stata pubblicata nel 1540 ma la sua stesura manoscritta sembra risalire ad un periodo circoscrittibile tra il 1530 e 1537 (Cfr. A. BERNARDONI, *La conoscenza del fare*, Roma: Erma di Bretschneider, 2011, XV).

³ Due esempi di rappresentazione miniata di bombarde sono degli assedi di Lisbona del 1384 e di Brest del 1386 (J. Froissart, *Croniques*, BNF ms. 2645).

⁴ Si veda ad esempio la raccolta di documenti di A. ANGELUCCI, *Documenti inediti per la storia delle armi da fuoco italiane*, (Torino: Tipografia editrice G. Candeletti, 1869).

⁵ «Die 11 februarii MCCCXXVI. Item possint dieti domini Priores artium et vexillifer justitie una cum dieto officio duodecim bonorum virorum, eis que liceat nominare, eligere et deputare unum vel duos magistros in officiales et pro officialibus ad fatiendum et fieri fatiendum pro ipso comuni pilas seu palloctas ferreas et canones de metallo pro ipsi canonibus et pallottis habendis et operandis pre ipsos magistros et officiales et alias personas in defensione comunis Fior.» (Archivio di Rif. Provis. Filza 23, f. 25, in ANGELUCCI, *Documenti inediti*, 491-492).

documenti relativi alla fusione delle armi da fuoco redatti da autori di cultura tecnica direttamente coinvolti nella loro produzione per questo periodo, ed anche se è plausibile ipotizzare una derivazione del metodo di fusione per le artiglierie da quello per la fusione della campane, lo stesso termine “metallo” col quale nel documento fiorentino si fa riferimento al bronzo era il nome di una particolare lega campana⁶, per le tecniche fusorie prima della fine del Quattrocento ci muoviamo delle deduzioni fatte a partire dai non molti reperti archeologici rimasti. Se si escludono, infatti, le non molte artiglierie quattrocentesche ancora oggi presenti in vari musei d'Europa, i documenti più ricchi di dettagli tecnici sulle armi dal fuoco, fino a circa la metà del XVI secolo, sono i manoscritti di Leonardo. Pur non avendo prove di un suo reale coinvolgimento nella produzione delle artiglierie i suoi manoscritti rappresentano oggi la finestra più ampia sulla tecnologia delle armi da fuoco medievali e rinascimentali, sia per quanto riguarda le tecniche di produzione sia in relazione agli studi e ai progetti fantastici anche degli ingegneri rinascimentali.

Nei disegni e nelle descrizioni tecniche di artiglierie lasciateci nei quaderni di ingegneri anteriori e contemporanei a Leonardo troviamo informazioni scarse e frammentarie. Francesco di Giorgio, ad esempio, fa soltanto un riferimento alla problematiche metallurgiche nella prima stesura del suo trattato per dire che il rame offriva maggiori garanzie di tenuta del bronzo⁷, mentre nella seconda stesura presenta soltanto il catalogo delle armi da fuoco da lui conosciute senza entrare però nei dettagli tecnico produttivi⁸. L'architetto e ingegnere di Francesco Sforza Antonio Averlino detto il Filarete, ricorda che nel Castello di Milano era presente una bombarda di “ferro” colato⁹, mentre il fiorentino Bonaccorso Ghiberti, nel suo *Zibaldone*, disegna alcune bombarde componibili, vari sistemi di puntamento e di affusto. Tuttavia, mentre qui non mancano disegni e indicazioni interessanti sulla fusione delle campane¹⁰, sono completamente assenti riferimenti alla tecniche di fusione.

Le stesse problematiche sorgono anche se ci spostiamo in area tedesca dove, nella pur ricca tradizione manoscritta facente capo al *Bellifortis* di Conrad Kyeser e al *Manoscritto anonimo delle guerre Ussite*, troviamo soltanto riferimenti ed illustrazioni efficaci alle armi da fuoco, relative esclusivamente all'uso e alle soluzioni di trasporto e puntamento delle artiglierie ma nessun riferimento alle tecniche di fusione.

La ragione di questa lacuna documentaria può certamente essere vista nella particolarità dell'oggetto artiglieria, che poteva essere protetto da segreto militare¹¹,

⁶ Biringuccio nella sua opera ci ricorda che «Metallo» è il termine con il quale si indica il bronzo con concentrazione di stagno dal 12 al 25 %, che è quello utilizzato per fare le campane e i mortai che, oltre alla durezza ha la caratteristica di resistere meglio all'ossidazione che da al bronzo il color verde del rame (BIRINGUCCIO, *De la pirotechnia*, 1977, f. 109r-v).

⁷ FRANCESCO DI GIORGIO, *Codice Ashburnham 361 (Trattato di architettura I)*, Biblioteca Medicea Laurenziana, Firenze, f. 53v (*Trattati di architettura, ingegneria e arte militare*, a cura di Curzio Maltese, Milano: Il Polifilo, 1967, 220).

⁸ FRANCESCO DI GIORGIO, *Ms. Magliabechiano II.I.141 (Trattato di Architettura II)*, Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, f. 48r (*Trattati di architettura, ingegneria e arte militare*, 418-420).

⁹ ANTONIO AVERLINO, detto il Filarete, *Trattato di Architettura, Ms. Magliabechiano, III.I.140*, Biblioteca Nazionale Centrale Firenze, c. 172v.

¹⁰ BONACCORSO GHIBERTI, *Zibaldone, Ms. B. R. 238*, Biblioteca Nazionale Centrale Firenze. Alcuni esempi di artiglierie sono alle cc. 74v, 84v, 88r.

¹¹ Si veda a tal proposito P. LONG, *Openness, Secrecy, Authorship : the Technical Arts and the Culture of Knowledge from Antiquity to the Renaissance*, (Baltimore and London: The John Hopkins University Press, 2001), 175-176.

ma in primo luogo anche al tipo di manoscritti che ci sono pervenuti, la stragrande maggioranza dei quali hanno un'impostazione didattico-divulgativa (cataloghi o album di disegni). I quaderni che contengono informazioni operative ad uso delle officine e delle fonderie costituiscono un materiale estremamente fragile e fortemente soggetto ad usura. Infine, un elemento non secondario, fonditori e operatori tecnici in genere, fino alla fine del Quattrocento e nella stragrande maggioranza dei casi anche dopo, costituivano una classe sociale poco abituata alla cultura scritta, spesso analfabeta, che vedeva nell'apprendistato e nella trasmissione diretta delle conoscenze da maestro ad allievo il principale veicolo dell'informazione tecnica¹². L'eccezionalità di Leonardo consiste nell'essere stato un abilissimo disegnatore e un osservatore instancabile che ha superato in questo tutti i suoi contemporanei. La definizione di Leonardo come "Tecnologo", avanzata in una comunicazione del 1953 da Alexander Koyré, rimane ancora oggi quella più appropriata per sottolineare il suo coinvolgimento con l'ingegneria e la scienza della natura¹³. È proprio grazie a questo suo approccio oltre che sperimentale anche mentale e quindi "teorico" alle macchine e ai processi tecnologici in genere, che si esplica prevalentemente attraverso il disegno, che noi oggi conosciamo molti aspetti della tecnologia rinascimentale e che ci permette di guardare a Leonardo come ad uno dei principali testimoni del suo tempo. La produzione delle armi da fuoco costituiscono a tal proposito un caso esemplare.

Nel lascito manoscritto di Leonardo si trovano infatti i riferimenti ad almeno tre tecniche di fabbricazione delle armi da fuoco che costituiscono la fonte più completa e dettagliata per il periodo tardomedievale e rinascimentale per questi tipi di lavorazione: 1) artiglierie in ferro saldato 2) artiglierie realizzate con il metodo di fusione a cera persa diretto 3) artiglierie realizzate con un metodo di fusione a cera persa parzialmente indiretto

LE ARTIGLIERIE IN FERRO SALDATO

La tecnica del ferro saldato che assembla alla fucina verghe e cerchi di ferro per formare la canna, o "tromba" come era chiamata all'epoca, è uno dei metodi più antichi per la produzione delle armi da fuoco.

Le bombarde medievali conservate oggi nei principali musei sono quasi tutte realizzate con questa tecnica che, per un certo periodo continuerà ad essere praticata e sviluppata anche dopo l'affermazione delle artiglierie di bronzo fuso, specialmente nelle aree minerarie ricche di ferro come la Svezia. In seguito, con i dovuti aggiornamenti, la tecnica del ferro saldato continuerà ad essere impiegata nella produzione delle armi da fuoco portatili. La tecnica di costruzione delle canne dei fucili e delle pistole veniva realizzata a partire da verghe di acciaio trafilate ripiegate su se stesse e saldate in modo da formare un tubo. Seguendo questa procedura anche le artiglierie di grandi dimensioni come le bombarde venivano assemblate saldando

¹² Si veda a tal proposito: P. GALLUZZI, *Prima di Leonardo*, (Milano: Electa, 1991), 15-44; *Gli ingegneri del Rinascimento*, (Firenze: Giunti, 1996), 13-14; A. BERNARDONI, *La conoscenza del fare*, Roma, 1-28.

¹³ A. KOYRÉ, «Léonard de Vinci 500 ans après», in *Études d'histoire de la pensée scientifique*, a cura di R. Taton (Paris: Presses Universitaires de France, 1966), 85-100.

insieme le verghe di acciaio alla fucina con la tecnica della bollitura¹⁴. Per rinforzare il cannone, come possiamo osservare nei reperti ancora oggi conservati nei musei, il tubo realizzato con le doghe saldate veniva rinforzato con robuste cerchiature di ferro.¹⁵

Una delle difficoltà principali che si incontravano in questo tipo di lavorazione era quello di come ottenere alla fucina doghe di ferro con profilo e sezione uniformi lungo tutta la loro lunghezza in modo da avere le stesse condizioni tecniche in ogni punto e ottenere una saldatura omogenea. Una zona particolarmente critica era quella corrispondente alla camera di esplosione o “coda”, come era chiamata al tempo, la quale, essendo sottoposta continuamente alle sollecitazioni degli scoppi della carica esplosiva era soggetta a fratture; una disomogeneità nella sezione di una doga creava un elemento di fragilità che poteva tradursi anche nell’esplosione del pezzo.

Nei manoscritti di Leonardo non troviamo riferimenti all’operazione di saldatura ma il suo impegno nello studio di questa tecnica è testimoniato da cinque fogli del Codice Atlantico (10r, 11r, 15v, 41r, 109bv) nei quali viene sviluppato il progetto di una trafilatrice idraulica per doghe di ferro e quello di una macchina, una molatrice o una calandra - i disegni non sono chiari - per conferire alle doghe il profilo ad arco di cerchio in modo che dalla loro giunzione longitudinale si arrivi ad ottenere il tubo cilindrico. Queste carte sono datate tra il 1510 e il 1515¹⁶, una data questa un po’ tarda se letta dalla prospettiva dell’rinnovamento delle armi da fuoco che gradualmente si ebbe a partire dalla discesa in Italia di Carlo VIII nel 1494; dall’inizio del secolo successivo, ad esempio, l’arsenale estense di Ferrara si specializzò proprio nella produzione di colubrine¹⁷. Tuttavia, questo impegno di Leonardo potrebbe anche essere letto come un tentativo di migliorare e rinnovare una tecnica molto diffusa nel Nord Italia, specialmente nel Bresciano e nel Bergamasco in cui esistevano molte ferriere di armaioli¹⁸. Come risulta dalla carta 40v del *Manoscritto B* Leonardo era stato in visita presso alcune ferriere bresciane durante gli anni novanta e aveva annotato le specificità di alcune armi da fuoco che si realizzavano in quel distretto. Non è escludibile, quindi, un suo interessamento alle armi bresciane anche nei primi anni del Cinquecento, come un tentativo di riavviare una produzione ormai in disuso, sorpassata dalla superiorità tecnica delle artiglierie in fusione.

Anche se disegnata in modo schematico per mettere in evidenza la cinematica della macchina – si tratta essenzialmente di un motore idraulico a ritrecine che

¹⁴ Le verghe venivano portate al «calor bianco» (1300°-1500°), una temperatura alla quale le molecole superficiali dell’acciaio si saldano insieme e quindi venivano consolidate attraverso un processo di martellatura.

¹⁵ Esempari di artiglierie in ferro saldato si trovano in vari musei europei. Uno dei principali è la splendida bombarda in ferro forgiato della metà del Quattrocento conservata oggi al *Musée de l’Armée* di Parigi (inv. N. 37).

¹⁶ C. PEDRETTI, *The Codex Atlanticus of Leonardo da Vinci: a Catalogue of its Newly Restored Sheets, Vol. I*, (New York: Johnson Reprint Corporation, 1978).

¹⁷ F. LOCATELLI, *La fabbrica ducale estense delle artiglierie: da Leonaello ad Alfonso II d’Este*, (Bologna: Cappelli, 1985), 50-52.

¹⁸ G. QUISTINI, «Le armi bresciane e della Val Trompia», in *Brixia 1882*, (Brescia: Stab. tip. E. Apollonio, 1882); *Repertorio storico degli archibugiari italiani dal XIV al XX secolo: maestri da canne, da serpi, da ruote, d’azzalini, schioppettari, archibugiari, armaioli, incassatori, mercanti d’armi e inventori*, a cura di Bruno Barbiroli, (Bologna: CLUEB, 2012).

alimenta contemporaneamente il sistema di trazione del ferro e il sistema di azionamento del dispositivo di pressione sulla trafila che poteva essere una camma o una vite premente – sono molte le considerazioni fattuali che portano a pensare ad un effettivo studio sulla fattibilità della trafilatrice idraulica studiata da Leonardo. Nel foglio 10r, ad esempio, emerge anche un tentativo di programmazione della lavorazione nel quale si tiene conto di fattori come il consumo della trafila, prevedendo di utilizzare un utensile nuovo per ogni doga in modo da garantire l'uniformità di lavorazione che, dopo un ciclo di lavoro, poteva essere compromessa dal consumo. La scelta degli ingranaggi, inoltre, doveva essere fatta in modo da garantire una sincronia tra rotazione della camma che pressa la doga e l'avanzamento di questa in modo che un giro completo della camma coincidesse con la lunghezza della doga stessa.

Nella carta 11r viene sottolineata, invece, l'importanza dell'energia idraulica che permette di sviluppare la potenza e la velocità di avanzamento necessaria perché l'operazione di trafilatura avvenga in tempi ragionevoli. Nel disegno di questa carta la camma è sostituita da una pressa a vite che, chiudendosi verso il basso riduce progressivamente la sezione della trafila in modo da ridurre lo spessore della doga. Sulla destra del foglio sono disegnati tre esempi di trafila a sezione variabile. Qui si specifica inoltre che le bave di ferro formatesi negli angoli delle doghe durante la trafilatura costituiscono un aiuto per la saldatura perché possono essere soprammesse e fuse insieme, visto l'esiguo spessore, durante la bollitura.

Nella carta 15v si trovano ancora studi dettagliati di questa macchina dai quali emerge la solidità dei sostegni, costituiti da robuste sbarre di ferro piegate ad "U", che ancorano la macchina al terreno; un altro elemento, questo, che mostra come Leonardo ne avesse individuato i punti nevralgici per il corretto funzionamento.

Nelle carte 11r e 15v viene preso in considerazione il problema di come conferire alla doga il giusto profilo ad arco di cerchio necessario per formare una circonferenza una volta unita alle altre doghe. Per questo tipo di lavorazione Leonardo studia alcune soluzioni alternative: progetta una molatrice che sagoma le doghe dopo la trafilatura (10r) ma pensa anche di utilizzare una camma con un profilo sagomato che si imprime sulla doga durante la trafilatura stessa (15v). Nella carta 41r si orienta verso un'altra soluzione che prevede l'impiego di una macchina con un grosso rullo che invece ricorda le odierne calandre. Tuttavia, è difficile dire se si tratta di una macchina che lavora per deformazione plastica o per asportazione di truciolo. Se questa macchina la si interpreta in continuità con la nota "rame e smeriglio" associata all'apparecchiatura disegnata nella carta 10r, il rullo potrebbe essere interpretato anche come un grosso cilindro abrasivo messo in movimento dalle ruote montate su un lato della macchina¹⁹. Verso questa interpretazione spinge anche il sistema con cui è montato il cilindro sulla macchina che, lasciato libero di scorrere lungo le guide, è in grado di adeguarsi al profilo obliquo, a sezione decrescente, della doga.

Le note di Leonardo a corredo della trafilatrice idraulica riportano anche alcuni rapporti di trasmissione che, seppur con le dovute cautele, consentono anche di fare ipotesi sulla durata dell'operazione di trafilatura. Il sistema di amplificazione e trasmissione della forza è costituito da tre dispositivi "vite-evolvente pignone", con le

¹⁹ Lo smeriglio è un minerale che fonde oltre i 2000 gradi quindi il termine rame e smeriglio può riferirsi ad una mola nella quale il rame è usato come legante per i frammenti di smeriglio.

viti, come si evince, da quanto riporta lo stesso Leonardo indicando i rapporti di amplificazione, che devono avere quattro principi. Anche se nel disegno ciò non risulta, lo si deduce contando i denti delle ruote che sembrano essere 48 e dal rapporto di amplificazione della forza annotato accanto alla macchina nel foglio 10r: 1000 – 12000 – 144000 – 1728000 – 2073600, e riproposto anche nel foglio 109br, cioè con successive moltiplicazioni di 12. Per avere questo rapporto di moltiplicazione con una ruota di 48 denti la vite deve avere quattro principi, cioè con quattro filetti indipendenti. Posto che le ruote siano tutte e tre di 48 denti e con viti a quattro principi, la macchina disegnata, che ha tre dispositivi di trasmissione vite-ruota, riuscirà a far compiere un giro completo alla camma ogni 1728 giri della ruota idraulica. In condizioni ideali, cioè rimanendo esclusivamente sul piano cinematico, senza considerare le forze parassite e la forza di trazione necessaria per trafilare (quest'ultima varia in funzione del tipo di materiale, della sezione e della temperatura alla quale viene lavorato), ipotizzando un ritrecine in grado di compiere sui 100 giri al minuto l'intera operazione di trafilatura della doga si completerebbe in circa 17 minuti.

Se la progettazione di una macchina del genere può essere il frutto di un'intuizione empirica ispirata da un problema tecnico da risolvere, sorprendente è invece il termine usato da Leonardo per denominarla: *trafilatrice uniformemente disforme*. Senza voler aprire qui un tema di meccanica medievale che andrebbe oltre il fini di questo contributo strettamente legato alla produzione delle armi da fuoco, è doveroso sottolineare come Leonardo abbia derivato questo termine dalla tradizione scolastica nella quale con esso venivano indicate le variazioni di intensità delle grandezze fisiche come ad esempio la velocità. I filosofi delle scuole di Oxford e Parigi rappresentavano graficamente questa variazione con un triangolo rettangolo in cui l'ipotenusa indicava la variazione di intensità²⁰.

La sovrapposizione di piani teorici e pratici così come le commistioni linguistiche costituiscono un tratto distintivo della mente di Leonardo la quale, una volta appropriatasi di un concetto cerca di declinarlo in ogni ambito dei propri interessi. La variazione di intensità sia questa riferita alle "potenze di natura" (forza, moto, peso e percussione), che alla variazione delle qualità sensibili dei corpi come il colore e il sapore, è uno dei concetti chiave della filosofia naturale e della meccanica di Leonardo che viene concettualizzata come variazione di tipo piramidale. Nel nostro caso questo concetto è applicato ad una macchina operatrice che deve generare profili piramidali in modo da offrire una resistenza crescente (piramidale) alla pressione dell'esplosione che si esercitava in maniera maggiore all'altezza della culatta.

²⁰ Cfr. M. CLAGGET, *La meccanica nel Medioevo*, (Milano: Feltrinelli, 1952), 378-379 e 390-391.

FUSIONE A CERA PERSA DIRETTA

Per quanto riguarda la tecnica di fusione a cera persa diretta, quel metodo, cioè che arriva alla fusione costruendo la forma direttamente sul modello in cera dell'artiglieria, troviamo un riferimento unico e inedito nella carta 167r sempre del Codice Atlantico. Qui sono illustrate tre fasi fondamentali del processo di costruzione della forma di fusione che costituiscono l'unica testimonianza oggi conosciuta relativa a questa tecnica. Nel disegno in alto è rappresentato l'assale interno del nucleo, solitamente costituito in legno o in metallo sul quale viene avvolta una corda in modo da aumentarne lo spessore e mantenere la forma cilindrica; la corda serviva, poi, anche per facilitare la rimozione del nucleo una volta eseguita la fusione poiché, attraverso il suo srotolamento si aveva la frantumazione della terra refrattaria che costituiva la parte esterna del nucleo a contatto con il bronzo. Una volta terminato l'avvolgimento intorno all'asta, infatti, la corda veniva ricoperta con una miscela di terre refrattarie fino al raggiungimento del diametro corrispondente al calibro della spingarda, modellando anche gli eventuali spallamenti necessari per creare l'alloggiamento della coda la quale, invece, veniva fusa a parte²¹.

Nel disegno più in basso, lungo il profilo superiore del nucleo, è marcata in nero la sezione longitudinale della spingarda che Leonardo dice di ottenere nel seguente modo: "To s'è un pentolino di sevo [una miscela di grasso e olio] o cera strutta e versasi su per la spingarda tuttavia girandola". In altre parole il modello in cera che in seguito si perde con la fusione, si ottiene distribuendo la cera mentre si ruota la manovella disegnata sulla destra. Talvolta, per ottenere il profilo concentrico si usa come sistema di controllo una dima che riproduce la sagoma esterna dell'artiglieria²². Il foglio non dà ulteriori informazioni ma, a partire dal modello in cera dell'artiglieria si procede direttamente alla costruzione della forma di fusione²³. La fase successiva è quindi quella della costruzione della forma esterna applicando sulla cera uno strato di terra refrattaria rinforzato poi esternamente con robuste cerchiature in ferro, necessarie per prevenire la possibilità che nel momento della fusione la spinta metallostatica del bronzo fuso potesse rompere la forma esterna. La preparazione finale della forma esterna simile sia per il metodo diretto che indiretto può essere visualizzata nelle carte 60r e 61r sempre del *Codice Atlantico*.

La fase successiva e conclusiva è quella di cottura della forma, necessaria per eliminare ogni traccia di umidità e per sciogliere la cera la quale viene fatta uscire in modo da liberare l'intercapedine che in seguito dovrà ospitare il bronzo fuso. A questo punto siamo pronti per la fusione.

²¹ Per visualizzare tutte le parti che costituiscono una spingarda si veda la carta 32r del *Codice Atlantico* (Milano, Biblioteca Ambrosiana): tromba, coda da avvitare, cavalletto, mantelletto, cartocci di carica.

²² Si veda a tale proposito la carta 53r e 60r sempre del *Codice Atlantico*.

²³ Che si tratti del metodo diretto segue dal fatto che il modello in cera è realizzato in maniera continua: canna, parti in aggetto e alloggiamento della "coda". Si fosse trattato del metodo parzialmente indiretto che si affermerà nel XVI secolo, il nucleo del cannone sarebbe stato eseguito in materiale persistente mentre la cera sarebbe stata utilizzata solo per le parti in aggetto. Una volta costruita la forma esterna in questo caso si sarebbe estratto il nucleo del modello, sostituito dal nocciolo di fusione nel momento del montaggio della forma. Per una descrizione di questo metodo di fusione si veda A. BERNARDONI, *La conoscenza del fare*, 135-148.

LA FUSIONE DELLE ARTIGLIERIE CON IL METODO PARZIALMENTE INDIRETTO

I fogli più dettagliati dedicati da Leonardo a questa tecnica di fusione sono contenuti nel *Codice Atlantico* (46r, 53r, 60r, 61r, 937r) e nel *Codice Trivulziano* (15v-17r) e riguardano la fusione di un'artiglieria componibile, ancora in uso nel tardo Quattrocento.

Nelle carte 60r e 61r del *Codice Atlantico* sono disegnate a bella copia alcune fasi del processo di formatura della canna del cannone. Anche in questo caso si tratta di documenti estremamente importanti perché costituiscono la fonte, di tipo grafico, più antica in nostro possesso per la codifica di questa tecnica di fusione. Ancora più interessanti sono le carte 46r e 53r, sempre di questo codice. Nella carta 46r oltre a riproporre la stessa serie di fasi disegnate nelle carte 60r-61r, questa è integrata anche con quelle relative alla costruzione del nucleo di fusione, della forma esterna e, infine, l'illustrazione della successione di fasi per l'assemblaggio definitivo della forma all'interno della fossa di fusione che completava la descrizione del metodo²⁴.

Come nel caso del metodo di fusione diretto si inizia con la costruzione del modello del cannone costituita da un'anima di legno fatta a partire da un perno cilindrico sul quale venivano montate alcune assi messe di taglio per formare una raggera, si veda a tale proposito anche il foglio 16v del *Codice Trivulziano*. Si procede quindi con un avvolgimento di corda per dare alla struttura più spessore e una forma cilindrica, ricoprendo poi il tutto con terra refrattaria fino a raggiungere la misura esterna che dovrà avere il cannone. Dopo aver tornito in cera anche tutte le parti in aggetto del cannone, si procede alla costruzione della forma esterna che sarà conclusa con la cottura. Anche la fase di cottura è visionabile in un disegno sempre del *Codice Trivulziano* alla carta XX. Nella carta 53r del *Codice Atlantico*, invece, troviamo un'altra rappresentazione inedita di uno studio, anche in questo caso non ripassato a penna, che illustra alcune fasi di questo processo di costruzione relativo alla forma di fusione della coda della bombarda che, trattandosi essenzialmente di un cilindro con un foro cieco, poneva problemi costruttivi diversi dalla canna, più simili a quelli delle artiglierie ad avancarica fuse in un unico pezzo²⁵. La tecnica di fusione è infatti simile. Trattandosi di un foro cieco non troppo profondo e non essendo particolarmente determinante la perfetta coassialità con la superficie esterna, il nucleo di fusione può essere anche un perno montato a sbalzo come è disegnato in questa carta da Leonardo²⁶. In questa carta troviamo anche la rappresentazione della parte superiore

²⁴ In alto sono rappresentate le fasi del processo di formatura di un artiglieria: costruzione del modello, della controforma e del nucleo di fusione. Il disegno della controforma è completato con la slitta per il trasporto (ripassata a penna). La stessa attrezzatura è riprodotta in maniera più dettagliata anche nella carta 60r. Nella parte centrale (appena visibili) sono riprodotte quattro viste in sezione che illustrano il montaggio della forma all'interno della fossa. In basso sono presenti alcuni disegni di artiglierie componibili viste in sezione, nelle quali è evidenziato l'accoppiamento filettato tra la culatta e il cannone (*Codice Atlantico*, c. 46r)

²⁵ Per una spiegazione della tecnica di fusione per le artiglierie ad avancarica si veda A. BERNARDONI, *La conoscenza del fare*, 135-148; M. MORIN, «Alcune note sui fonditori veneziani d'artiglierie del XVI secolo e sulle loro opere», in *L'industria artistica del bronzo del rinascimento a Venezia e nell'Italia settentrionale*, a cura di Matteo Ceriana e Victoria Avery, (Venezia: Scripta edizioni, 2008), 345-362.

²⁶ In alto, ripassati a penna, sono rappresentati il canale che porta il bronzo dal forno alla forma e il meccanismo manuale per la tornitura della controforma esterna completo della sagoma per controllarne il profilo e la coassialità. Sulla destra il disegno di un'artiglieria completa. Appena visibili sono presenti anche una serie di disegni che illustrano la forma di fusione della culatta vista in sezione

della forma di fusione con su montato il canale per il trasferimento del bronzo dal forno alla forma. Un elemento questo che si trova rappresentato con altrettanta chiarezza soltanto in una delle incisioni di Domenico Beccafumi sull'Arte dei metalli²⁷.

Nella carta 60r è rappresentata a bella copia la slitta su rulli per il trasporto della forma di fusione, già disegnata anche nella carta 46r, rappresentata con ancora il modello all'interno. Estremamente interessante è il percussore disegnato sulla sinistra che serve a percuotere il perno centrale e rimuovere l'anima lignea. Per la rimozione della terra rimasta all'interno della forma, come abbiamo già spiegato illustrando il metodo di fusione diretta, si agisce sulla corda che, srotolandosi, frantumando l'argilla liberando la forma dai resti del nucleo.

Con le forme della "tromba" e della "coda" liberate dal modello su cui sono state costruite e una volta realizzato il nucleo di fusione come descritto nella carta 46r, le varie sezioni vengono cotte, rifinite e, infine, assemblate insieme all'interno della fossa di fusione.

CONCLUSIONI: LE NUOVE ARTIGLIERIE AD AVANCARICA

Questo excursus sulle tecniche di fusione in Leonardo si conclude con la carta 937r del *Codice Atlantico* nella quale troviamo rappresentate le forme di fusione della "tromba" e della "coda" della bombarda qui disegnate in maniera allineata sullo stesso asse con l'intercapedine evidenziata di colore diverso. La forma è rappresentata completa in ogni sua parte (forme esterne, anime di fusione e i tappi)²⁸.

In basso a destra è rappresentato il tappo superiore, con il foro centrale per il sostegno del nucleo di fusione e quattro strappi, ortogonali tra loro, attraverso i quali il bronzo liquido viene introdotto all'interno della forma. In alto, lo stesso elemento è rappresentato in modo da evidenziare il profilo sagomato che deve accoppiarsi con la forma esterna.

Un elemento curioso di non semplice interpretazione è il disegno in centro a destra nel quale sembra essere rappresentato in primo piano il sistema di formatura di un bilico per ancorare il cannone sull'affusto. Questi elementi, cioè, il disegno delle sezioni sullo stesso asse e il tentativo integrare la forma con i bilichi, anche se solo a livello di congettura, possono essere visti come uno studio nel quale Leonardo sta ripensando la sua tecnica di fusione nella prospettiva di arrivare a fondere le delle artiglierie in un unico pezzo, probabilmente sollecitato dalla constatazione della superiorità di questo tipo di armi introdotte dai francesi.

Il disegno delle due sezioni della forma di fusione sullo stesso asse potrebbe essere, infatti, un appunto grafico nel processo di elaborazione mentale per cercare di adottare le proprie conoscenze sulla fusione al nuovo tipo di artiglieria in modo da integrare la tromba e la coda in unico pezzo.

longitudinale. Particolare attenzione è riservata al disegno della leva in ferro che serve per rimuovere il nucleo di fusione dopo aver eseguito la colata (*Codice Atlantico*, c. 53r).

²⁷ D. BECCAFUMI, *Le incisioni alchemico-metallurgiche di Domenico Beccafumi*, a cura di Mino Gabriele, (Firenze: Giulio Giannini e figlio editori, 1988).

²⁸ Soltanto la parte inferiore del disegno è realizzata dalla mano di Leonardo. La parte superiore è probabilmente un'integrazione di Pompeo Leoni che riproduce la parte mancante del disegno oggi conservata nella collezione di Windsor (f. 12433v).

La constatazione empirica della superiorità di queste artiglierie emerge in un appunto dello stesso Leonardo, nella carta 32r del *Manoscritto B* risalente agli anni 90 del Quattrocento, in cui si elabora un esperimento per stabilire quale fosse il più potente tra quattro diversi tipi di artiglieria²⁹.

Leonardo non va oltre i disegni della carta 937r e da quello che si è potuto constatare nei suoi manoscritti non sembra essersi mai dedicato ai problemi tecnici che emergono nella produzione delle artiglierie ad avancarica, una tecnologia questa che troverà la sua prima descrizione chiara ed esaustiva con la pubblicazione del *De la pirotechnia* dell'ingegnere senese Vannoccio Biringuccio avvenuta a Venezia nel 1540. Tuttavia, due carte del *Codice Atlantico*, le 62r e 63r, dimostrano come Leonardo conoscesse bene le artiglierie ad avancarica introdotte dalle truppe francesi e di come egli ne avesse registrato meticolosamente tutte le misure necessarie alla loro riproduzione. Queste due carte, tra l'altro, costituiscono un capitolo interpretativo ancora aperto e non è chiaro neanche il periodo nel quale queste siano state prodotte. Quello che si può constatare da una loro rilettura è che non si tratti di un rilievo fatto su artiglierie all'interno di qualche arsenale, ma di disegni copiati dal quaderno di qualche altro ingegnere militare ancora da identificare o, magari, sono la trasposizione a bella di qualche disegno a brutta copia dello stesso Leonardo andato perduto. Da una loro rilettura emergono due fatti curiosi e cioè una lacuna dimensionale nella descrizione della terza colubrina della carta 63r (colubrina più che mezzana), come se fosse assente o non leggibile nel disegno originario e, cosa ancora più curiosa, sono le schede dei falconi, il vecchio e il nuovo, che nella carta 62r sono invertite rispetto ai disegni. Questo induce a pensare ad una mutuazione dell'errore presente anche nella fonte di Leonardo o, comunque, ad un errore nella copiatura. Crediamo che la storia di queste due carte così come quella delle artiglierie francesi disegnate da Leonardo sia un capitolo ancora da dirimere e a tale proposito possiamo aggiungere, grazie alla ricerca per termini di E-Leo, che i termini "colubrina" e "cannone", quest'ultimo riferito ad un arma da fuoco, sono due hapax negli scritti vinciani. Questi disegni, inoltre, insieme alla carta 48r della seconda stesura del *Trattato di Architettura* di Francesco di Giorgio, costituiscono la fonte più antica in nostro possesso di un tentativo di razionalizzazione dei calibri. E da un loro confronto credo emerga molto bene il rinnovamento che ha rivoluzionato la tecnologia delle armi da fuoco tra la fine e gli inizi del Cinquecento, che sostanzialmente consiste oltre all'avancarica nella riduzione dei calibri e dei modelli. Non più bombarde che sparavano palle di pietra scolpite pesanti fino anche a 200 kg ma pezzi di artiglierie come i cannoni e le colubrine che sparavano palle di ghisa pesanti nell'ordine dei 10-20 kg. Di fronte alla classificazione di Francesco di Giorgio che insieme a tre tipi di bombarda riporta ancora i *mortai*, i *passavolanti*, i *basilischi*, le *cerbottane* e le *spingarde*, oltre all'*archibugio* e lo *scoppietto* come armi portatili³⁰, Leonardo nei due "fogli francesi" riduce le artiglierie a tre soli tipi: i *cannoni*, le *colubrine* e i *falconi*.

²⁹ L'esperimento consisteva nel montare a coppia le artiglierie alzo a 90° in modo da poter verificare empiricamente quale fosse quella che sparava più in alto, la cui palla avrebbe impiegato un tempo maggiore per tornare al suolo. Confrontando quattro artiglierie con diversa camera di esplosione quella più efficiente risulta essere l'artiglieria ad avancarica (*Ms. B 32r*).

³⁰ Francesco Di Giorgio, *Ms. Magliabechiano II.L.141*, f. 48r

Un catalogo questo confermato sostanzialmente anche da Biringuccio circa trenta anni dopo nel *De la pirotechnia*³¹.

³¹ Biringuccio accanto a questi tre pezzi di artiglieria reintroduce anche il Sacro un altro tipo di cannone di piccole dimensioni (*De la pirotechnia*, cc. 78v-80v).