

# Macchine da cantiere per il sollevamento dei pesi, nell'antichità, nel Medioevo, nei secoli XV e XVI\*

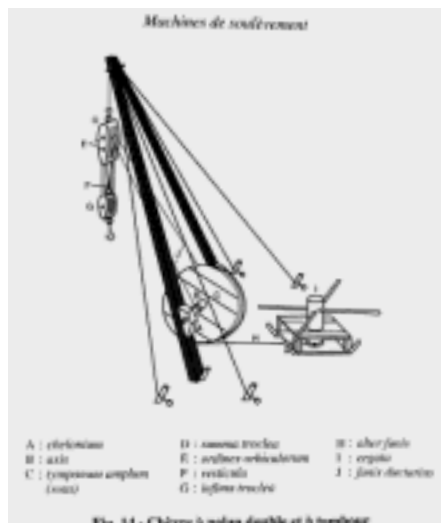
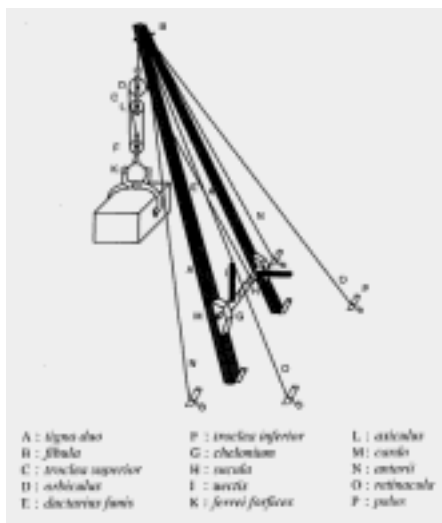
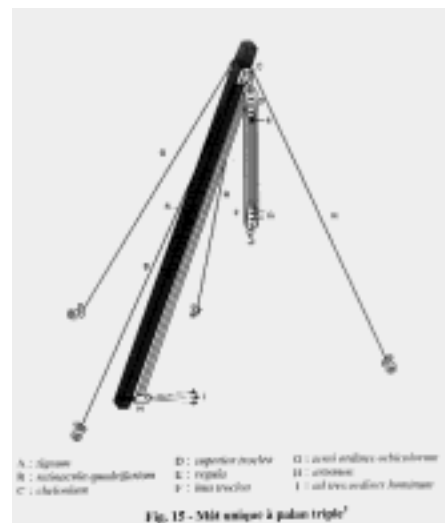


Fig. 14 - Chèvre à poulie double et à tambour

Fig. 15 - Mât unique à poulie triple<sup>7</sup>

1. Philippe Fleury, ricostruzione della prima macchina da sollevamento di Vitruvio, capra con paranco e verricello (da P. Fleury, *La mécanique de Vitruve*, Caen 1993, fig. 13).

2. Philippe Fleury, ricostruzione della seconda macchina da sollevamento di Vitruvio, capra con paranco doppio, tamburo e argano (da P. Fleury, *La mécanique...*, cit., fig. 14).

3. Philippe Fleury, ricostruzione della terza macchina da sollevamento di Vitruvio, antenna con paranco triplo (da P. Fleury, *La mécanique...*, cit., fig. 15).

## L'epoca romana

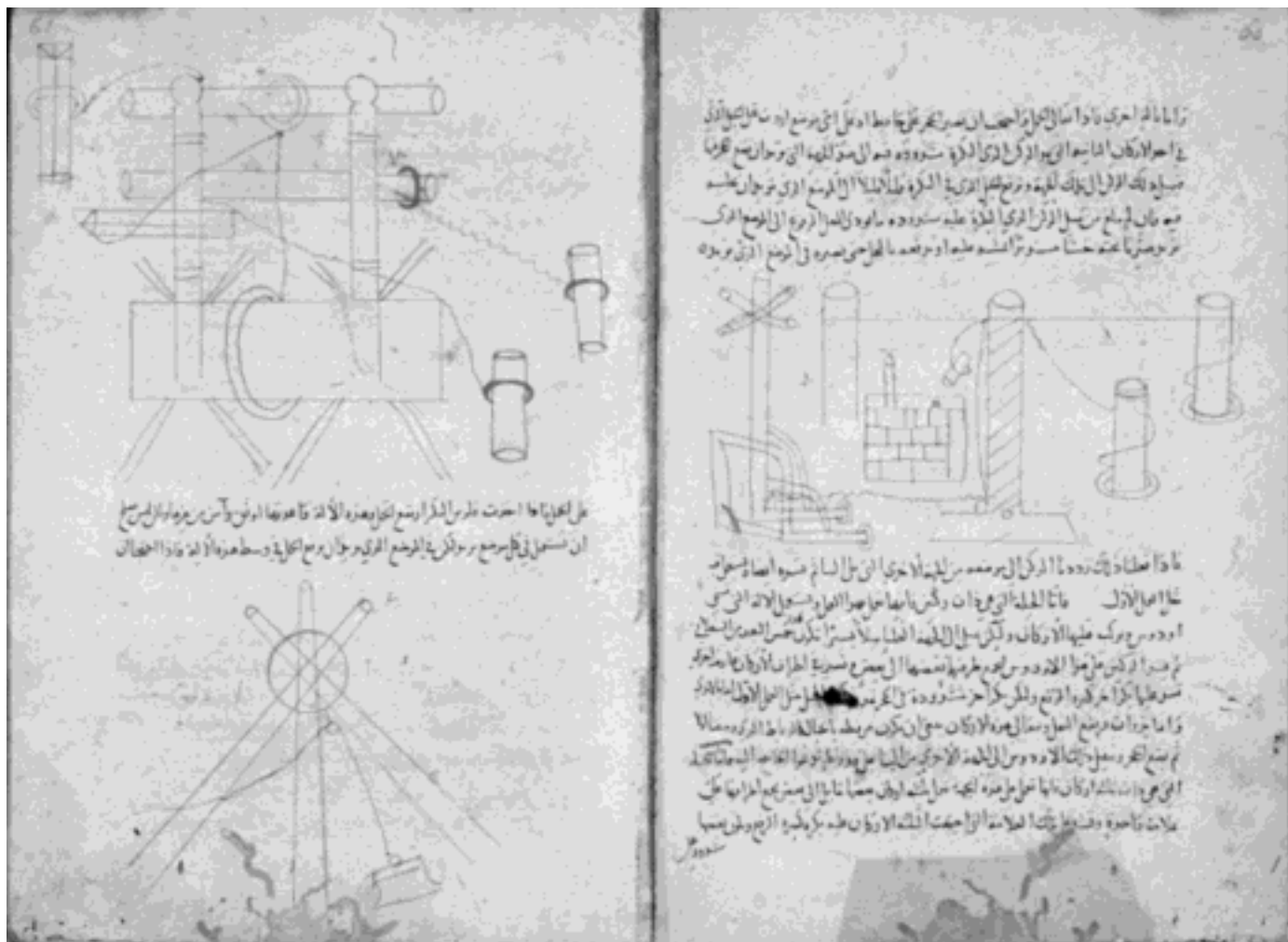
Vitruvio dedica il X libro del *De Architectura* alla meccanica; in esso descrive tre macchine da sollevamento per il cantiere edile. I disegni originali del trattato sono perduti e per le macchine conviene riferirsi alle ricostruzioni grafiche di Philippe Fleury<sup>1</sup>. La prima macchina<sup>2</sup> è una capra con paranco e verricello (ill. 1). La capra è un bigo o biga formata da due antenne unite in alto da una legatura di fune oppure da una caviglia; il bigo è trattenuto in posizione da funi fisse o controventi. Il verricello è disposto tra le due antenne. Il paranco è a tre pulegge, *trispastos*<sup>3</sup>; la voce è greca ed è tradotta da Fleury "che tira tre volte"<sup>4</sup> cioè moltiplica per tre la forza motrice del verricello.

La seconda macchina da sollevamento descritta da Vitruvio<sup>5</sup> è una capra con paranco doppio, tamburo e argano (ill. 2). Lo schema della capra è il medesimo. Il *trispastos* ha tre coppie di pulegge con due funi traenti. Al posto del verricello vi è un tamburo sul cui asse si avvolgono le due funi traenti; il tamburo è azionato da un argano. *Quodsi maius tympanum conlocatum aut in medio aut in una parte extrema fuerit sine ergata, calcantes homines expeditores habere poterunt operis effectus*<sup>6</sup> – "Per la qual ragione se sarà stato collocato un tamburo più grande al centro oppure a un'estremità, senza argano, degli uomini che premono coi piedi [sul tamburo] potranno ottenere più speditamente l'effetto della macchina".

La terza macchina<sup>7</sup> è un'antenna unica con paranco triplo (ill. 3). Ogni taglia ha tre ordini di tre pulegge ciascuno con tre funi traenti. Le funi possono essere tirate direttamente da tre file di uomini esperti; l'antenna può inclinarsi e deporre il carico con precisione. Il nome di questo genere di macchina è *polyspastos*<sup>8</sup> ed ha un paranco con 18 pulegge.

Nella prima macchina, cioè nella *trispastos*, la fune traente che esce dal paranco sopporta un carico P con uno sforzo P/3. Nella seconda macchina, le due funi traenti sopportano un carico P con uno sforzo P/6 per ciascuna. Nella terza, lo sforzo delle tre funi traenti è P/18 per ciascuna. Il limite di portanza di queste macchine consiste nella resistenza delle corde di canapa: per le funi antiche sono possibili solo ipotesi<sup>9</sup>. Per le funi moderne Daniele Donghi dà risultati sperimentali: il carico di sicurezza è 1 Kg/mm<sup>2</sup>; il carico di rottura è 8-10 Kg/mm<sup>2</sup>; la fune bagnata perde 1/4 della sua resistenza; le funi fisse hanno una portanza maggiore di quelle in movimento<sup>10</sup>. Secondo Fleury, la potenza massima della seconda macchina, il *trispastos* azionato da una ruota con uomini calcanti, raggiungeva 11 tonnellate<sup>11</sup>; la potenza massima della terza macchina, 13-14 tonnellate<sup>12</sup>, tenendo conto anche dell'attrito.

Infine, secondo Fleury, Vitruvio ha descritto tre macchine da sollevamento che conosceva personalmente per averle viste in funzione<sup>13</sup>; esse corrispondono a macchine che furono real-



4. *Erone di Alessandria*, Il sollevamento dei pesi, p. 60, antenna con argano; p. 61, gru a due alberi, gru a treppiede. Leiden, Bibliotheek der Rijksuniversiteit, cod. Or. 51, 1445 circa (foto Bibliotheek der Rijksuniversiteit).

mente impiegate nei cantieri romani del I secolo a.C. Il *De Architectura* fu ultimato intorno al 30-27 a.C.<sup>14</sup> prima dell'inizio delle grandi fabbriche in opera laterizia; Vitruvio tratta di laterizi ma si riferisce prevalentemente a mattoni crudi seccati al sole<sup>15</sup> mentre in quell'epoca l'impiego dei cotti era riservato a particolari opere a contatto con acqua e fuoco come le stufe<sup>16</sup>. Proprio nell'epoca augustea cominciò la coltivazione delle cave di Luni cioè di Carrara<sup>17</sup> e cominciò l'impiego estensivo di quel marmo nelle costruzioni pubbliche: dunque possiamo immaginare macchine come quelle vitruviane nel cantiere del Foro di Augusto e particolarmente intorno al tempio di Marte Ultore; le sue colonne sono formate da rocchi sovrapposti e alte 60 piedi<sup>18</sup>, un'altezza che fu superata successivamente nel tempio di Serapide sul Quirinale<sup>19</sup> all'epoca di Caracalla. Vitruvio descrive anche altre macchine di impiego civile<sup>20</sup>, per il trasporto dei fusti monolitici di colonne, per il sollevamento dell'acqua ma sono le macchine per il sollevamento dei pesi che rappresentano la tecnologia edilizia.

Una testimonianza fondamentale per l'epoca

romana è l'opera di Erone di Alessandria<sup>21</sup> 'Ο βαρουλκός<sup>22</sup>, *La macchina da sollevamento* o meglio *Il sollevamento dei pesi*. Otto Neugebauer<sup>23</sup> ha datato l'attività di Erone alla seconda metà del I secolo d.C., grazie all'eclisse di luna del 13 marzo 62 che è citata in un'altra sua opera, Περὶ διόπτρας, *Intorno alla Diottra*. 'Ο βαρουλκός non è un trattato come il *De Architectura* ma un libro di scuola per studenti di architettura comprensivo di esercizi. L'argomento di studio è la meccanica, divisa in tre libri; il primo comprende argomenti di cinematica, di geometria, inoltre il pantografo, il piano inclinato, le travi appoggiate; il secondo comprende le cinque macchine semplici cioè il verricello, la leva, la girella e il paranco, il cono, la vite, la moltiplicazione dell'effetto mediante la combinazione delle macchine, il baricentro, esercizi. Il terzo, infine, descrive macchine di cantiere per il sollevamento di blocchi e colonne, l'olivella e altri ferri per la presa dei blocchi, nonché torchi a vite. È un'opera poco nota poiché è pervenuta attraverso la tradizione araba. L'originale fu scritto in greco e di esso esistono frammenti raccolti nella



5. Erone di Alessandria, Il sollevamento dei pesi, p. 3, argano con manovella. Leiden, Bibliotheek der Rijksuniversiteit, cod. Or. 51, 1445 circa (foto Bibliotheek der Rijksuniversiteit).

Collezione matematica di Pappo<sup>24</sup>. La versione in arabo si deve a Qustâ ibn Lûqâ negli anni 862-866<sup>25</sup>. Il manoscritto arabo più completo è conservato a Leida e fu copiato intorno al 1445<sup>26</sup>.

La pagina 60 del *ms. Or. 51* di Leida mostra una macchina di sollevamento azionata da un argano (ill. 4). L'antenna è unica e sostenuta da tre controventi fissati ad altrettanti uomini morti o colonne. Al piede di ognuna di queste colonne è avvolta ordinatamente la coda della fune, disponibile per la manovra dell'antenna che evidentemente è girevole e inclinabile. L'albero dell'antenna è rinforzato da una fune, avvolta strettamente a elica, che, come viene scritto nel testo, può servire ai manovratori per arrampicarsi in cima. Al piede dell'antenna è una girella per il rinvio della fune di manovra all'argano; inoltre, c'è un perno orizzontale che consente ai manovratori di inclinare l'antenna e posare il carico. Il muro sullo sfondo è in costruzione e i due segni curvi, divaricati sulla sua sommità, rappresentano una tenaglia per la presa, inserita in un blocco.

La prima figura del manoscritto di Erone presenta un argano azionato da una manovella

(ill. 5). L'argano è composto da 6 ruote dentate che formano un sistema di verricelli capace di moltiplicare 200 volte la forza motrice o meglio il momento della manovella: così il braccio di un bambino muovendo l'ingranaggio sarà capace di spostare un carico di 1000 talenti, pari a 21 tonnellate<sup>26</sup>. Questo primo paragrafo costituisce l'introduzione ai tre libri e pare collocato fuori posto rispetto all'organizzazione della materia: il risultato è suscitare la meraviglia di chi legge. *Θαυμάζειν* - "ammirare stupefatti una meraviglia" era la poetica della scienza e della tecnica della cultura ellenistica.

Infine, in Erone ci sono formule matematiche, espresse in forma letteraria come in Euclide. La formula di Erone per il piano inclinato è la risoluzione più approssimata del mondo antico e medioevale fino a Galileo<sup>28</sup>. Erone non considera il piano inclinato tra le macchine semplici perché il carico da innalzare resta costantemente appoggiato; i meccanici dell'antichità classica consideravano macchine da sollevamento quelle che sospendono il carico mediante funi. La vite<sup>29</sup>, che è il principio del martinetto, era impie-

6. Virgilio, Eneide, fol. 13 r, costruzione di Cartagine. Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana, cod. Vat. Lat. 3225, IV-V secolo (foto Biblioteca Apostolica Vaticana).

7. Costruzione del sepolcro degli Haterii, fine I secolo. Città del Vaticano, Museo Gregoriano Profano, Sezione II n. 9998 (foto Monumenti Musei e Gallerie Pontificie).



gata per i torchi e negli ingranaggi di argani e di strumenti di precisione.

Una miniatura del “Virgilio Vaticano”<sup>30</sup> presenta un grande cantiere: Enea e Acate dall’alto di una collina assistono alla costruzione di una città, Cartagine (ill. 6). Il codice è del secolo IV-V e la figura è a piena pagina. Al centro della scena di cantiere è una macchina di sollevamento. La miniatura illustra il libro I dell’*Eneide*, versi 419-429 e particolarmente:

*Hic portus alii effodiunt; hic alta theatri  
fundamenta locant alii inmanisque columnas  
rupibus excidunt, scaenis decora alta futuris.*

L’antenna pare avvolta da una fune come quella di Erone; ma la forza motrice è esercitata da una ruota come nella seconda macchina di Vitruvio. Le lacune dentro e intorno alla ruota non permettono di individuare con certezza le azioni dei manovratori. L’elemento sollevato è una colonna il cui capitello si trova per terra, al-

la estremità destra. Questa miniatura documenta dunque la continuità e la consuetudine delle stesse macchine di sollevamento nell’arco di quattro secoli.

Un documento di eccezione di tale continuità è costituito dal rilievo che rappresenta un tempio funerario e una gru, proveniente dal sepolcro degli *Haterii*<sup>31</sup> sulla via Labicana e conservato nel Museo Gregoriano in Vaticano (ill. 7). Questo rilievo unisce precisione della figura, attendibilità, datazione. Infatti, un altro bassorilievo proveniente dallo stesso sepolcro raffigura numerosi monumenti pubblici e tra essi con certezza l’arco di Tito, il Colosseo limitatamente al terzo ordine: la scenografia degli edifici rimonta all’inizio del principato di Domiziano. Il titolare della tomba fu probabilmente *Q. Haterius Ty-chicus*, liberto del console del 53 *Q. Haterius Antoninus*, vissuto tra Nerone e i Flavi, che fu *redemptor* cioè appaltatore di opere dello Stato tra cui evidentemente i celebri edifici rappresentati. La gru degli *Haterii* è azionata da una gigantesca ruota con cinque uomini calcanti dentro; a terra, altri due operai collaborano con funi al movimento della ruota probabilmente nell’intento di vincere l’inerzia iniziale. L’antenna è inclinata verso il tempio che evidentemente è stato appena ultimato; la gru è trattenuta da sette controventi di cui due davanti ad essa e cinque dietro; ogni controvento è collegato all’antenna mediante una taglia con due girelle: il sistema consente manovre di precisione come per il picco di una nave. Sull’antenna sono evidenti le testate di trasversi orizzontali. Secondo Fleury questa gru corrisponde alla seconda macchina da sollevamento di Vitruvio<sup>32</sup> (ill. 2) cioè è formata da due distinti montanti convergenti alla sommità, di cui quello in vista copre l’altro.

Questo bassorilievo consiste in una lastra di marmo larga 104 cm, alta 130, spessa 13,5 sul bordo. La scultura è profonda mm 65 con molti particolari controllabili solo da vicino. Da un’osservazione autoptica si può constatare che i montanti sono effettivamente due, ben distinti e ricavati nella profondità del bassorilievo. I montanti sono paralleli e sembrano costituire un’antenna unica, irrigidita dai trasversi, come nella terza macchina di Vitruvio (ill. 3) piuttosto che due antenne divaricate come nella prima e seconda macchina (ill. 1-2). Il sollevamento è effettuato da un paranco di cui vediamo la taglia fissa sospesa alla sommità; la taglia mobile e il carico sono coperti dalla gradinata del tempio funerario. La taglia, ovvero il bozzello, consiste in pulegge che non vediamo, disposte in una cassa formata da due maschette di legno: sulla maschetta in vista sono evidenti le teste di 4 perni, tre quadrate e una circolare in alto sulla quale poggia il piede un operaio. Non vediamo il vincolo del bozzello alla sommità dell’antenna

8. Apollodoro di Damasco, Poliorcetica, fol. 126 v, trapezio per l'osservazione oltre le mura nemiche. Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana, cod. Vat. Gr. 1164, metà XI secolo (foto Biblioteca Apostolica Vaticana).



9. Erone di Bisanzio, Poliorcetica e Geodesia, fol. 40 r, ponte mobile su coppia di navi, ariete su coppia di navi, ponte protetto su antenna, piattaforma su vite. Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana, cod. Vat. Gr. 1605, XI secolo (foto Biblioteca Apostolica Vaticana).



perché esso è coperto da un cestino di vimini capovolto. Sotto la maschetta è possibile contare diversi tratti di fune: 5 in primo piano e 3 in secondo piano negli spazi lasciati liberi dai primi. Quelli in secondo piano sono segnati con piccole tacche inclinate e parallele che formano l'immagine del canapo torticcio. Un tratto di fune in primo piano è proprio sull'asse della maschetta: evidentemente rappresenta l'estremità del cavo che è fissata alla taglia, senza che ne sia illustrato il modo di fissaggio. I tratti di fune sono complessivamente 8. L'estremità del cavo esce in alto tra il bozzello e l'antenna: il cavo scompare tra i due montanti dell'antenna e a ben guardare i cavi uscenti sono due distinti, dunque i cavi traenti sono con certezza due.

Proviamo l'interpretazione di questi dati al fine di ricostruire il tipo di paranco. Sul bozzello sono rappresentate le teste di 4 perni e questa è l'osservazione oggettiva di partenza. Tuttavia non sono rappresentati due particolari importanti di questo bozzello: in alto il vincolo alla sommità dell'antenna, che si chiama stroppo, in basso il vincolo della fune al bozzello. La precisione del rilievo fa escludere che questi due vincoli siano sottintesi; per esempio, nei 6 bozzelli dei controventi che sono interamente visibili, gli stroppi sono fatti con una legatura passante in un foro attraverso le maschette. Bisogna concludere che i due vincoli non sono omessi ma semplicemente nascosti dalla rappresentazione stessa: come già osservato il cesto capovolto sulla sommità dell'antenna nasconde la parte alta del bozzello. Qui il perno a testa tonda è diverso dagli altri e proprio questo perno supporta lo stroppo cioè il cavo forte di collegamento tra bozzello e antenna; forse questo stroppo era un

anello o una catena, di ferro come un'olivella, poiché sopportava da solo l'intero carico. Per il collegamento tra fune e bozzello, possiamo immaginare che l'estremità della fune che figura sulla mezzeria del bozzello, sia ripiegata sotto la maschetta a formare una gassa cioè un nodo con occhio intorno a una puleggia o direttamente intorno al perno più basso con testa quadra. Insomma i due perni in alto e in basso sono certamente destinati a vincolare il bozzello rispettivamente all'antenna e alla fune. Restano allora disponibili due perni con testa quadra e possiamo pensare che ciascuno porti una coppia di pulegge perché le funi traenti sono due. Secondo la mia interpretazione, le pulegge libere di ruotare nel bozzello sono complessivamente 4, da cui pendono 8 tratti di fune come si vede effettivamente nel rilievo. Questa macchina è dunque un *polispastos*. Le due funi traenti sopportano il carico sospeso con uno sforzo pari a  $1/8$  del suo peso. Il motore che muove le due funi è una macchina semplice cioè "l'asse nella ruota", formata da una ruota calcatoria il cui diametro è pari all'altezza dell'ordine architettonico del tempio funerario oppure all'altezza di tre uomini l'uno sull'altro. L'energia motrice è fornita da 5 uomini che salgono i gradini nella ruota.

Per completezza, sul fascio di funi pendenti dal bozzello fisso, all'altezza del timpano del tempio, è possibile individuare un altro tratto di fune in secondo piano, verso il tempio; questa fune è caratterizzata da un diametro più piccolo e governa il bozzello del controvento che è in secondo piano davanti alla macchina. Invece, il fascio di funi contiguo all'antenna è formato da 5 canapi, tre in primo piano, due in secondo piano negli spazi liberi tra i primi: queste funi governano i 5

10. Pakistan, saqiya, particolare  
(da A.Y. Al-Hassan, D.R. Hill, *Islamic technology, Cambridge-Paris, 1988, fig. 2.2 b*).

11. Siria, Hama, norie sul fiume Oronte  
(da P. Cuneo, *Noria, in D. Jones (a c. di), Il teatro delle acque, Roma 1992, fig. 9*).



controventi dietro la macchina<sup>33</sup>. Infine, possiamo immaginare che con questo tipo di macchina siano stati costruiti gli edifici raffigurati sul sepolcro degli Haterii: l'arco di Tito e il Colosseo.

Nell'antichità le macchine più potenti, con più funi traenti, potevano sollevare monoliti di decine di tonnellate: fino a 26 secondo Fleury<sup>34</sup>, fino a 30 secondo Coulton<sup>35</sup> cioè l'equivalente di un cubo di marmo di Carrara di oltre 2 metri di lato.

La poliorcetica, l'arte di espugnare le città mediante macchine, fu nell'antichità un campo di applicazione e di sviluppo della meccanica. Nel periodo di massima estensione dell'impero, Apollodoro di Damasco, l'architetto di Traiano, del foro, della colonna, delle terme che portano il nome di questo imperatore scrisse un compendio originale di poliorcetica<sup>36</sup>. L'opera consiste in disegni esecutivi e spiegazioni tecniche con una lettera di accompagnamento indirizzata a un imperatore, individuato in Adriano da Théodore Reinach<sup>37</sup> e da Ernest Lacoste<sup>38</sup>. L'eccezionalità di Apollodoro

sta nell'autorevolezza e, di conseguenza, nella conoscenza della sua personalità artistica. Nella lettera all'imperatore, Apollodoro assicura l'invio di disegni autografi e di un suo assistente con carpentieri capaci di costruire, manovrare e dimostrare le macchine descritte e disegnate. Le macchine sono: testuggini, arieti, ponti, torri, osservatori per vedere oltre le mura (ill. 8), scale, apparecchi per versare liquidi bollenti su bastioni, zattera, e combinazioni di esse. A differenza di altri autori che meravigliano per il gigantismo delle costruzioni meccaniche, concepite per un unico assedio come Masada<sup>39</sup>, le macchine di Apollodoro sono agili e leggere, dotate di più funzioni, grandi ma costruibili con piccoli pezzi. Apollodoro vanta nella lettera la rapidità d'impiego dei suoi congegni e l'idoneità per guerre d'invasione, caratteristiche originali rispetto alla precedente poliorcetica. La grande struttura di piccoli elementi è la caratteristica propria di un altro primato d'ingegneria del mondo antico, opera dello stesso Apollodoro e insuperata: il ponte sul Danubio<sup>40</sup> a valle delle Porte di Ferro; di esso restano le teste di ponte con le pile<sup>41</sup>, la raffigurazione sulla colonna Traiana<sup>42</sup>, la memoria di un trattato autografo non pervenuto<sup>43</sup>. Non abbiamo altrettante notizie sul cantiere di costruzione della colonna Traiana che fu un altro primato di snellezza e di architettura megalitica nello stesso tempo: il capitello è un monolite di 44,6 tonnellate, innalzato a 50,6 metri dal piano del foro. L'agilità delle macchine da guerra di Apollodoro e il gigantismo della colonna Traiana sono le espressioni apparentemente opposte di una medesima concezione meccanica delle costruzioni<sup>44</sup>.

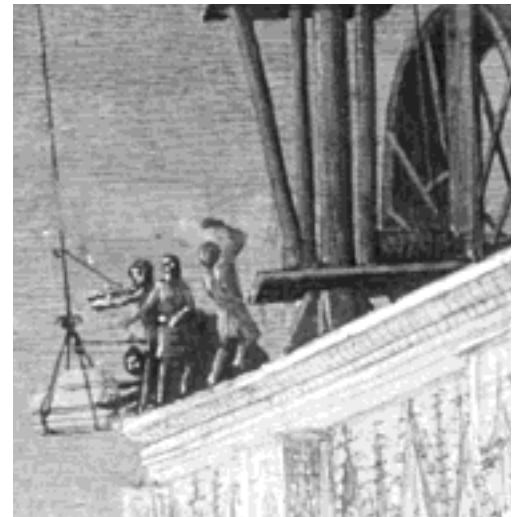
Durante l'impero bizantino, la poliorcetica fu una tradizione di fonti e di tecnica dei mondi ellenistici e romano<sup>45</sup>. Erone di Bisanzio è un epitomatore di opere classiche, attivo durante il regno di Costantino Porfirogenito, nella prima metà del secolo X; Alphonse Dain data la sua opera tra il 927 e il 934 in occasione dei successi riportati dai Bizantini sui Saraceni<sup>46</sup>. Un solo codice ha conservato la sua opera, che comprende anche un'epitome della *Diottra* di Erone: *Vaticanus Graecus 1605* della Biblioteca Apostolica Vaticana<sup>47</sup>. Il fol. 40 r mostra quattro figure (ill. 9): un ponte mobile da sbarco, montato su due navi aggioate; un ariete montato su due navi aggioate, utile anche come ponte da sbarco; un ponte protetto, montato su un'antenna e munito di funi di manovra "come le gru"<sup>48</sup>. La quarta figura mostra una piattaforma montata su una grande vite "girata con bracci di leva in su e in giù. Così anche Damide di Colofone pone le sambuche su alberi filettati, come il meccanico Bitone nei suoi commentari di poliorcetica". Damide è un



12, 13. Flaviio Giuseppe, Storia antica dei Giudei, fol. 163r; miniatura di Jean Fouquet, la costruzione del tempio di Salomonea Gerusalemme, foglio intero e particolare. Paris, Bibliothèque Nationale de France, cod. Fr. 247, 1476 circa (foto Bibliothèque Nationale de France).

ingegnere ellenistico non meglio noto; Bitone è un trattatista della prima metà del III secolo a.C.; la sambuca di Bitone è un ponte da assedio, montato su una vite alta circa 4,5 m<sup>49</sup>. Secondo Otto Lendle<sup>50</sup>, questo congegno di sollevamento a vite è perfettamente regolabile dai soldati prima dell'assalto, in funzione dell'altezza del muro assediato: nel caso sia mai stata costruita, sarebbe l'unica macchina antica da guerra basata sul principio della vite. Inoltre il congegno rappresentato costituisce un martinetto, cioè un meccanismo di difficile costruzione che presuppone scienza geometrica e tecnologia<sup>51</sup> di altissimo livello.

La conoscenza dei principi della meccanica, l'esperienza e la tecnica sono attestate nel periodo classico e nel Tardoantico dalle macchine impiegate per l'edilizia e per la guerra: evidentemente anche prima dell'impiego di materiali diversi e di energie diverse da quelle disponibili immediatamente in natura venne costruito ogni genere di macchina di sollevamento, realizzabile in legno, con alti limiti di portanza<sup>52</sup>.



### Il Medioevo

La cultura delle macchine acquisita dall'impero romano è stata successivamente tramandata dall'impero bizantino e poi dall'Islam: le tradizioni di Apollodoro di Damasco e di Erone di Alessandria sono esempi del ritorno in Oriente della cultura scientifica dopo la dissoluzione dell'impero romano.

Di alcuni argomenti si perse la memoria nell'Occidente europeo. Ne costituisce un esempio eloquente la vite di Archimede: si tratta di una macchina di sollevamento dell'acqua che vince solo piccole prevalenze ma è capace di prosciugare bacini di profondità minima. Ateneo, uno scrittore contemporaneo di Marco Aurelio, riferisce l'invenzione ad Archimede che la costruì per prosciugare la sentina della nave di Gerone di Siracusa<sup>53</sup>. A sua volta Archimede intorno alla seconda metà del IV secolo a.C. aveva già visto la vite idraulica funzionare in Egitto per l'irrigazione dei terreni. L'unica fonte antica che descrive la costruzione della vite e il suo impiego è Vitruvio<sup>54</sup>, che però non ne cita l'inventore. Fu impiegata comunemente e diffusamente durante l'impero romano nell'agricoltura per irrigare e nelle miniere per prosciugare le gallerie da infiltrazioni d'acqua<sup>55</sup>. In seguito alla dissoluzione dell'impero romano anche di questo strumento in Occidente si perse la memoria benché venisse tramandata nei trattati e nell'agricoltura dell'Islam<sup>56</sup>. Riapparve in Europa a partire dall'Umanesimo, forse attraverso la rilettura di Vitruvio<sup>57</sup>. Anche Andrea Palladio si interessò alla vite di Archimede<sup>58</sup>.

Ritengo che la continuità delle macchine nel Medioevo europeo sia avvenuta attraverso l'agricoltura, cioè l'esperienza sviluppata dall'economia agricola. Ne troviamo un valido esempio nel mulino ad acqua. Marc Bloch nel 1935 dedicò un saggio a questo tema dal titolo *Avène-*

14. Basinio da Parma, Hesperis Libri XIII, fol. 126r, miniatura di Giovanni di Bartolo Bettini da Fano, costruzione del tempio Malatestiano. Paris, Bibliothèque de l' Arsenal, cod. 630, post 1457-ante 1468 (foto Bibliothèque Nationale de France).



ment et conquêtes du moulin à eau<sup>59</sup>. La forma più elementare è il *ritrécine*, cioè una ruota a palette da mulino, messa in acqua orizzontalmente con l'asse verticale: la rotazione è immediatamente disponibile per una macina senza ulteriori congegni. "La sua invenzione non sembra poter essere attribuita a una civiltà ben determinata"<sup>60</sup>; fu usato indipendentemente in Siria, Romania, Norvegia, Shetland. "D'altra parte esso è totalmente differente dal meccanismo che ci fanno conoscere i più chiari tra i testi antichi, come Vitruvio [...] è certo che il mulino greco romano comportava una ruota verticale"<sup>61</sup>.

Non interessa qui individuare l'origine del mulino ad acqua, lo sviluppo e la propagazione, l'antecedenza della ruota orizzontale o viceversa della ruota verticale, né lo scarso utilizzo durante l'impero romano rispetto alle mole mosse da schiavi o da cavalli. Interessa invece sottolineare a questo punto che intorno al Mille, in territori distanti senza reciproca relazione, comparve il *ritrécine*: questa macchina risolse due problemi fondamentali cioè la trasformazione dell'energia dalla corrente d'acqua in energia meccanica e la trasmissione del moto dal pelo dell'acqua al piano del mulino. Il *ritrécine* non richiede organi di trasmissione come il mulino a ruota verticale eppure quando funziona è un capolavoro di carpenteria. In alcune valli alpine a economia chiusa il *ritrécine* può essere stato all'origine di altre macchine. Nel Museo Etnografico Dietenheim di Brunico sono conservati tipi di mulino ad acqua azionanti macchine diverse, tutti congegni omogenei per la costruzione meccanica essenzialmente di legno.

Ancora due giudizi di Marc Bloch: "Non bisogna infatti ingannarsi: invenzione antica, il mulino ad acqua è medievale dal punto di vista della sua effettiva diffusione [...] La ruota fornita di pale poteva infatti trasmettere, senza considerevoli modificazioni, il suo movimento a macchine ben diverse dalla macina per il grano"<sup>62</sup>. La sega idraulica di tronchi d'albero, ideata da Villard de Honnecourt è forse il primo esempio medioevale di questa macchina, disegnata intorno al 1270<sup>63</sup>: è mossa da una ruota da mulino. In epoca romana, intorno al 370 erano già in funzione segherie idrauliche di pietra calcarea su un affluente della Mosella presso Treviri<sup>64</sup>. Successivamente se ne perse la memoria e intorno al Mille i segatori illustrati da Rabano Mauro tagliavano i marmi con una grande sega a telaio, manovrata a mano da due persone<sup>65</sup>.

Nel mondo islamico le macchine di sollevamento dell'acqua, sia per irrigazione che per adduzione, sono state tramandate fino all'età moderna da congegni di legno di fattura apparentemente primitiva, in territori agricoli. La *saqiya*<sup>66</sup> (ill. 10) è composta da una lanterna orizzontale su pignone, mossa dal giro di un bue; ad essa è ingranata una ruota dentata verticale il cui asse fa girare una ruota a secchielli. La *na'ura*, noria<sup>67</sup> (ill. 11), è invece una grande ruota verticale a cassette, che solleva l'acqua di un fiume mossa dalla corrente stessa.

Ritengo che le norie del bacino del Mediterraneo e i mulini ad acqua dell'Europa continentale abbiano potuto trasmettere al Medioevo l'esperienza di carpenteria e di meccanica che era stata sviluppata dal mondo industriale romano nell'antichità; al contrario, l'esperienza meccanica del Medioevo si sviluppò in un mondo dapprima contadino e sulla base di questa esperienza furono costruite le macchine dei cantieri edili. Come in Vitruvio le ruote di sollevamento dell'acqua, il mulino ad acqua, i tamburi delle gru mossi da uomini calcanti, costituiscono un unico libro, il X, così nel Medioevo questi stessi congegni furono l'espressione della tecnica meccanica di cui il cantiere edile era una parte.

I cantieri delle cattedrali<sup>68</sup> furono il teatro più rappresentativo della tecnica edilizia e delle macchine. La complessità spaziale e strutturale, l'altezza delle cattedrali comportarono un'organizzazione importante del lavoro a piè d'opera e delle macchine in quota sull'edificio stesso in costruzione: le immagini di quei cantieri restano in illustrazioni coeve, di vetrate, mosaici, codici e in quelle immagini cogliamo immediatamente alcune differenze rispetto al cantiere antico. Le fasi di lavorazione della pietra fino alla scultura erano compiute a terra: i pezzi già finiti venivano collocati in opera; invece nei cantieri dell'antichità i blocchi erano

15. Piero di Cosimo, La costruzione di un palazzo, particolare, circa 1515-1520. Sarasota, Florida, The John and Mable Ringling Museum of Art (foto The John and Mable Ringling Museum of Art).

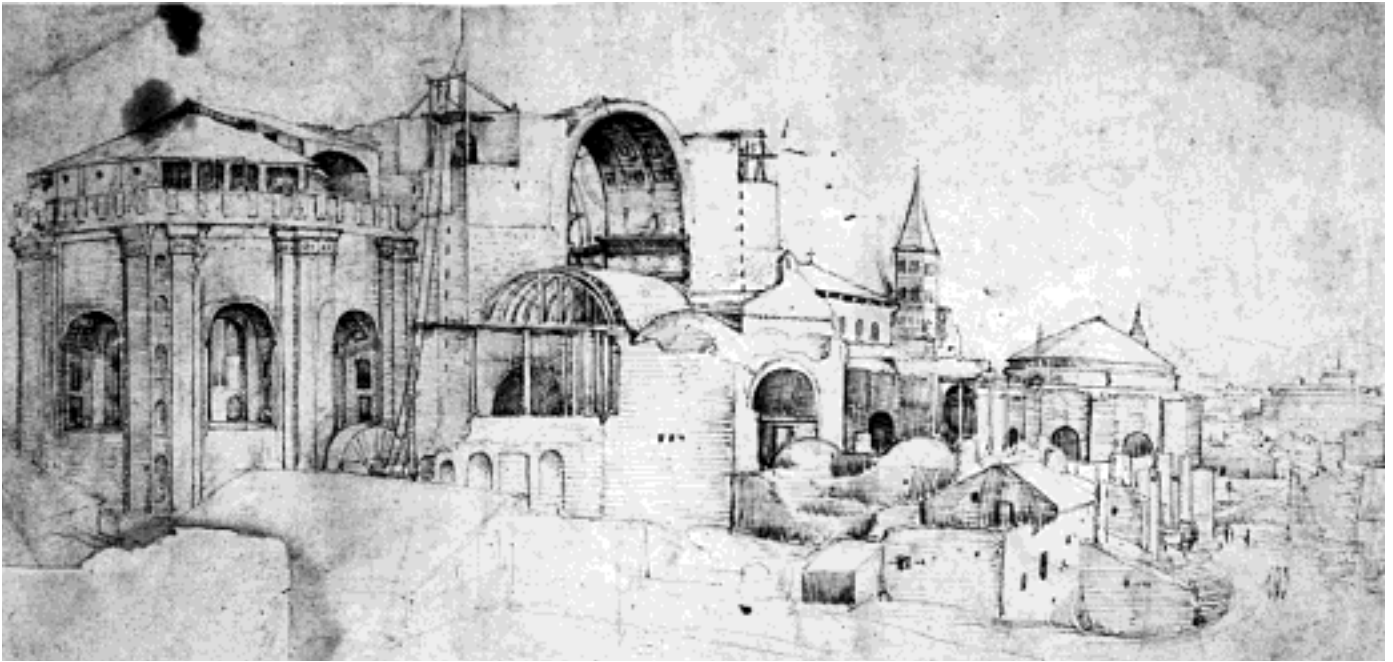


scolpiti in opera, sia i bassorilievi<sup>69</sup> che le sculture delle colonne<sup>70</sup>. I pezzi di pietra da montare erano più piccoli rispetto al cantiere antico, grandi meno di un singolo scalpello; si può constatare questa differenza osservando due edifici rappresentativi delle rispettive età: la colonna Traiana a Roma, la facciata del duomo a Orvieto. Nei cantieri delle cattedrali le macchine erano montate in alto sulla fabbrica stessa, in posizioni particolari, sopra torri, al centro di facciate, in angolo tra lati contigui della fabbrica; invece, nei cantieri antichi di costruzioni a blocchi le macchine erano certamente a terra. I cantieri delle cattedrali erano mediamente più alti di quelli antichi e movimentavano pezzi più piccoli: nella fabbrica di Santa Maria del Fiore a Firenze, i blocchi di pietra del cerchio di chiusura della cupola pesano circa 750 Kg ognuno<sup>71</sup>. La disposizione in alto di una gru comporta di conseguenza un risparmio nella lunghezza delle funi rispetto alla disposizione in basso e riduce il lavoro perduto rispetto al lavoro utile prodotto dalla macchina. Nei cantieri delle cattedrali vennero inoltre impiegate gru girevoli<sup>72</sup>.

Jean Fouquet, intorno al 1476, illustrò un libro sulle antichità giudaiche per Jacques d'Armagnac Duca di Nemours e in una pagina dipinse la costruzione del tempio di Salomone come un cantiere gotico<sup>73</sup> (ill. 12): è un'immagine efficace, precisa e con molti particolari. Jean Fouquet fu a Roma tra il 1443 e il 1447<sup>74</sup> ove dipinse un ritratto del Papa Eugenio IV per interessamento di Antonio Averulino, il Filarete, che espressamente lo considerò tra i migliori pittori<sup>75</sup> insieme a Jean van Eyck. Nella miniatura, dinanzi al tempio di Salomone numerosi operai sono al lavoro: a destra uno impasta la calce con una marra e due sono intenti rispettivamente a rovesciare e portare secchi d'acqua; a sinistra uno scalpello sbazza

un blocco con un'ascia; al centro un altro lavora una modanatura di un costolone con un picchiaro a due mani; a destra di questo, un altro con subbia e martello apre la sede di un perno su un blocco decorato con due timpani. Tra i pezzi a terra vi è un solo blocco figurato e su questo è chino un maestro che ha un copricapo del tutto differente dagli altri cioè una benda sulla fronte annodata sulla nuca; egli è intento a misurare il braccio della figura con un balaustrino mentre ai suoi piedi sono due utensili e un martello tondo di legno: evidentemente è un scultore. Altri operai in coppie movimentano pezzi con barelle, altri entrano nel tempio con gerle e cesti contenenti materiale sfuso.

L'ordine architettonico più alto del tempio è di colore bianco come le pietre in lavorazione a terra; gli ordini inferiori, già finiti, sono dorati. Sulla destra, al margine della miniatura, è una impalcatura costruita su un corpo di fabbrica laterale più basso; sul ponteggio lavorano tre operai e quello seduto sul piano più alto è intento a dipingere in oro la pietra con un lungo pennello. Infine, sulla sommità della fabbrica vi è una gru (ill. 13); vicino ad essa sono raffigurati quattro uomini: il primo di spalle manovra una fune pendente dall'alto, gli altri due in piedi hanno le mani protese verso il carico mentre due lunghi uncini avvicinano il carico sospeso e sembrano manovrati da dietro al gruppo dei quattro operai in primo piano; finalmente il quarto operaio in ginocchio tocca i blocchi con le mani: il carico è composto da elementi sovrapposti, forse tre parti di cornice. Nella finzione della figura sembra molto freddo sulla sommità della fabbrica poiché i quattro hanno il capo avvolto nel mantello. La struttura verticale della gru è complessa: nel baricentro appare un'antenna cilindrica sostenuta al piede da puntoni inclinati; ai lati di essa vi sono tre alberi complanari, di diametro minore, due verticali e uno inclinato verso il carico. Era una gru girevole come quelle di Brunelleschi<sup>76</sup>? La miniatura è molto precisa ma la rappresentazione è interrotta dalla cornice superiore del foglio; il disegno preparatorio doveva essere completo come dimostra un elemento inclinato che è appena visibile sopra il tamburo, ma subito interrotto dalla cornice. Quel che è certo, è il motore costituito da un tamburo gigante il cui raggio è pari all'altezza di due uomini. Nel tamburo non vi sono operai ma la gru è ferma perché il carico è arrivato a destinazione: i calcanti sono scesi e sono forse i tre uomini che stanno avvicinando il carico. Il tempio di Salomone illustrato da Jean Fouquet assomiglia al primo ordine della facciata della cattedrale di Reims<sup>77</sup> e ancor di più alla facciata occidentale della chiesa di Saint-Wulfran ad Abbéville, costruita a partire dal



16. Attribuito a Pieter Coecke, costruzione della basilica di San Pietro, 1524. Città del Vaticano, Biblioteca Apostolica Vaticana, Gabinetto delle stampe, Collezione disegni Thomas Asbby, n. 329 (foto Biblioteca Apostolica Vaticana).

17. Polidoro da Caravaggio, la posa della prima pietra della basilica costantiniana, circa 1524, particolare. Città del Vaticano, Palazzo Vaticano, sala di Costantino (foto Carlo Guidotti).



1488<sup>78</sup>. Possiamo allora immaginare che quest'ultimo edificio gotico sia stata costruita con una gru simile a quella che Jean Fouquet dipinse intorno al 1476.

#### *I secoli XV e XVI*

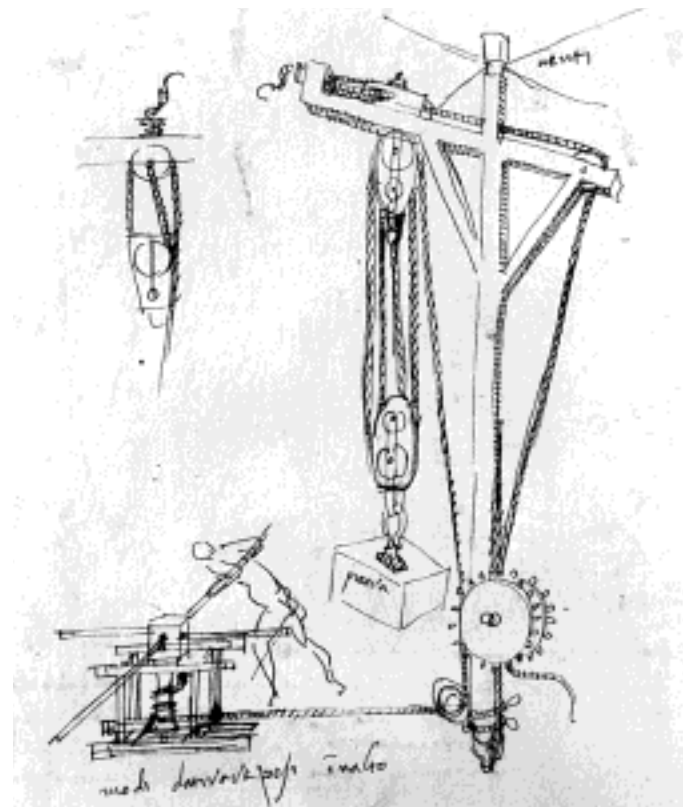
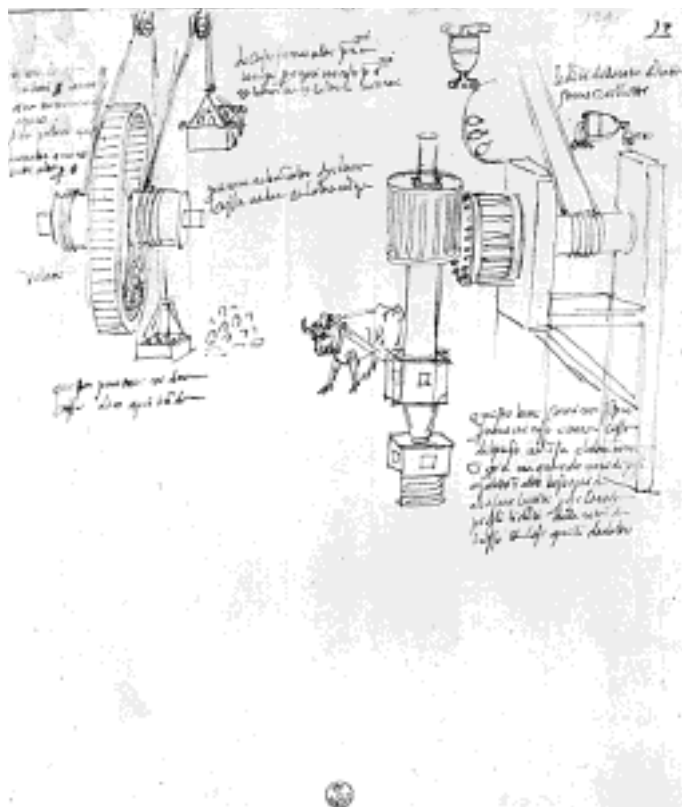
La stagione dei cantieri delle cattedrali europee culminò in Italia con la cupola di Santa Maria del Fiore<sup>79</sup>. Le invenzioni di Filippo Brunelleschi vennero illustrate da altri: Mariano di Jacopo detto il Taccola, Francesco di Giorgio Martini, Bonaccorso Ghiberti, Giuliano da Sangallo, Leonardo da Vinci<sup>80</sup>. Tali illustrazioni in età contemporanea sono state tradotte in modelli funzionanti e in modelli virtuali<sup>81</sup>. Quegli autori diedero vita alla trattatistica rinascimentale sulle macchine, che risulta fondata sulla lettura dei trattati antichi, sulle figure dei codici latini, bizantini, tedeschi, sui miti della tecnica del mondo antico eguagliati nel cantiere di Brunelleschi. Nell'intento di superare quei miti, la trattatistica arrivò a concepire "macchine impossibili", "mentali" secondo la definizione di

Daniela Lamberini<sup>82</sup>: "I codici cinquecenteschi sono infatti ricchissimi di 'tiari' e 'alzari', di argani e gru di ogni tipo e stazza, indicati fin dai prototipi di Francesco di Giorgio, da cui in massima parte derivano, come macchine 'da edificare'. È però praticamente impossibile riconoscere tra questi congegni ingegnosi e complicati gli strumenti effettivamente in uso nei cantieri ordinari, soprattutto civili".

Limitereò l'argomento ad alcuni momenti, a documenti di macchine rappresentate nel contesto del cantiere di fabbriche reali.

Il fol. 126 r del codice 630 della Bibliothèque de l'Arsenal di Parigi (ill. 14) rappresenta il cantiere del tempio Malatestiano di Rimini<sup>83</sup>, nello stato dei lavori prima del 1468. Il codice contiene il poema di Basinio da Parma, *Hesperis Libri XIII*, che narra le gesta di Sigismondo Pandolfo Malatesta<sup>84</sup>; tre copie furono miniate da Giovanni di Bartolo Bettini da Fano e sono conservate a Oxford, a Parigi, in Vaticano<sup>85</sup>. L'illustrazione qui riprodotta è l'unica che rappresenta davanti all'ingresso del tempio una figura elegante nell'atto di osservare i lavori, forse Leon Battista Alberti secondo Daniela Lamberini<sup>86</sup>.

Sull'angolo sinistro della fabbrica è una gru: è costituita da un'antenna, appoggiata a terra su una base apparentemente di pietra e sostenuta in alto da quattro venti, due ancorati sulla fabbrica stessa e due fuori campo. I venti sono tesi ciascuno da un paranco; le quattro funi di manovra arrivano a terra e sono ordinatamente avvolte al piede dell'antenna. Il motore è un argano azionato da due uomini mediante un lungo aspo. Il carico è raffigurato a metà circa dell'antenna ed è un concio modanato; esso è sol-



18. Antonio da Sangallo il Giovane, macchina da sollevamento con ruota azionata da un calcante, macchina da sollevamento con vite di inversione azionata da un bue, in alto a destra tre particolari dei rulletti. Firenze, Galleria degli Uffizi, Gabinetto dei disegni e delle stampe, U 1504 A r (foto Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici di Firenze).

19. Giovan Francesco da Sangallo, parte sinistra, falcone azionato da un argano e particolare. Firenze, Galleria degli Uffizi, Gabinetto dei disegni e delle stampe, U 3951 A r (foto Soprintendenza per i Beni Artistici e Storici di Firenze).

levato mediante un paranco a due taglie: quella fissa è sulla testa dell'antenna, quella mobile è vincolata direttamente al carico. L'antenna ha una sezione poderosa che si apprezza confrontandola con l'uomo che sale su di essa mediante dei gattelli. Altri gattelli più grandi caratterizzano il ponteggio sul fianco della fabbrica in costruzione e servono per congiungere i travicelli di legno che formano i montanti del ponte. Un'altra macchina serve il fianco della fabbrica: sul ponte c'è una carrucola e a terra un verricello; il carico è un secchio per materiali sfusi. La gru che fu impiegata per il tempio Malatestiano è del tutto simile alla terza macchina da sollevamento di Vitruvio e alla gru di Erone: non vi è un rapporto di derivazione ma di semplice continuità, che durò fino all'inizio del nostro secolo<sup>87</sup>. Nel Rinascimento questa macchina era detta "stella" o "falcone".

L'antenna raffigurata nella costruzione del tempio Malatestiano era certamente comune anche a Firenze: nella spalliera dipinta, conservata a The John and Mable Ringling Museum of Art di Sarasota (ill. 15), in Florida, è rappresentata una simile gru. La tavola faceva parte di un prezioso arredamento fiorentino ed è concordemente attribuita a Piero di Cosimo, negli anni 1515-1520; rappresenta il cantiere di un edificio ideale e proprio per questo i gruppi degli artigiani e gli utensili sono dettagliati e verosimili. L'edificio è stato identificato in un *gymnasium* da

Daniela Lamberini e tutte le azioni raffigurate intorno convergono in una interpretazione umanistica e morale dell'arte di edificare<sup>88</sup>.

Sul corpo di fabbrica a destra, nel mezzo della facciata c'è un falcone. L'antenna poggia su una base di legno, apparentemente un carrello con quattro piccole ruote piene. Sulla sommità è situato un trasverso di legno che sostiene il carico: questo elemento nelle antenne moderne veniva chiamato propriamente "falcone"<sup>89</sup>. Il motore è una ruota, solidale all'antenna, toccata da due operai: uno sta in piedi sul terreno e l'altro sta salendo sulla ruota stessa assicurandosi all'antenna; evidentemente la ruota può essere mossa sia da terra a mano come una "lanterna" munita di pioli, sia dal calcante. La gru sta deponendo l'ultima statua: si vede appena uno spazio vuoto tra il piedistallo e il piede della statua. L'antenna è leggermente inclinata verso la facciata; questa inclinazione si apprezza direttamente in rapporto all'appiombamento del pilastro retrostante e indirettamente dalla tensione diversa dei quattro venti: quelli ancorati all'edificio, verso il quale l'antenna è inclinata, sono laschi. Anche questa antenna pare dotata di gattelli: ne sono visibili due sullo sfondo chiaro del fregio della trabeazione. A sinistra della ruota, per terra, è seduto un altro operaio che raccoglie la fune traente, evidentemente per non appesantire l'asse della ruota; un simile operaio è ritratto vicino all'argano nel cantiere del tempio Malatestiano.

Un disegno della Collezione di Thomas Ashby, conservato nella Biblioteca Apostolica Vaticana<sup>90</sup>, rappresenta il cantiere di San Pietro ed è stato datato con certezza da Christoph Luitpold Frommel all'inizio del 1524<sup>91</sup> (ill. 16); è stato attribuito dubitativamente a Jan van Scorel e recentemente a Pieter Coecke da Nicole Dacos<sup>92</sup>. L'artista ha ripreso la fabbrica da sud-ovest e possiamo vedere da sinistra a destra: il coro di Bramante, il braccio meridionale del transetto in costruzione, il corpo longitudinale della basilica costantiniana, il suo campanile, la rotonda di Santa Maria della febbre con dietro la punta dell'obelisco e sullo sfondo all'estrema destra castel Sant'Angelo. In alto emerge l'arco voltato sui pilastri meridionali della cupola. Sul terreno, davanti al coro, è una grande ruota di una macchina da sollevamento; sull'asse della ruota si avvolgono due funi pendenti dall'alto; il castello di sollevamento è posto sopra il pilastro sud-occidentale e un castello analogo sta sul pilastro opposto. La ruota è il motore dell'impianto: funziona evidentemente con uomini calcanti come la ruota del sepolcro degli *Haterii* ed è un grande impianto fisso a terra; invece la stazione di sollevamento è mobile secondo la progressione verso l'alto della fabbrica. Una stazione intermedia sta all'imposta della centina, già predisposta per il getto della botte sul passaggio sud-occidentale, adiacente al transetto. "Tra aprile e novembre del 1524 in effetti risultano pagate simili ruote"<sup>93</sup>.

Un dipinto di Polidoro da Caravaggio rappresenta una di queste ruote. Nella sala di Costantino in Vaticano, Polidoro dipinse i chiaroscuri del basamento<sup>94</sup> a imitazione di rilievi in bronzo<sup>95</sup>. In particolare, nella parete ovest dipinse la posa della prima pietra della basilica costantiniana<sup>96</sup> (ill. 17). Nella parte centrale di questa scena figura l'altare della vecchia basilica e davanti a esso lo scavo di fondazione del pilastro nord-orientale della nuova; sono presenti il papa Clemente VII, l'imperatore Costantino e gli architetti del nuovo San Pietro<sup>97</sup>: la contemporaneità di parti del vecchio e nuovo San Pietro corrisponde allo stato effettivo dei lavori mentre la contemporaneità di personaggi dell'età di Costantino e di personalità rinascimentali corrisponde all'allegoria *templi Petri instauratio*<sup>98</sup>. Questa scena fu dipinta intorno al 1524<sup>99</sup>. Sullo sfondo della parte centrale ci sono alcuni elementi architettonici a terra: un capitello corinzio, una base di tipo ionico doppia, un elemento di cornice, un fusto di colonna; dietro la colonna sono due figure in piedi e dietro ancora due cammelli, un elefante, una ruota da sollevamento e una scala a libretto<sup>100</sup>. Infine, la ruota è posta proprio nell'area di cantiere del coro, là dove fu ritratta con maggior realismo da Pieter Coecke nello stesso periodo.

Un dipinto di Giorgio Vasari, nel palazzo della Cancelleria a Roma, sala dei cento giorni, mostra lo stato del cantiere di San Pietro nel 1546<sup>101</sup>. Il punto di vista è simile a quello della veduta di Coecke ma più a sud tanto da vedere l'obelisco non coperto dalla rotonda di Santa Maria della febbre. Si vede distintamente la centina della volta a botte del braccio meridionale del transetto e dentro la centina sull'asse della botte c'è una ruota da sollevamento. Questa pare di diametro minore rispetto a quella raffigurata da Coecke. Evidentemente la ruota a piè d'opera a servizio dei pilastri della cupola era più grande e più potente.

Antonio da Sangallo il Giovane partecipò al cantiere di San Pietro dal 1507 fino al 1546, quando morì; all'inizio era assistente di Bramante nella qualità di capofalegname<sup>102</sup>. I suoi disegni comprendono macchine e carpenterie<sup>103</sup> impiegate durante quaranta anni di attività. Tra le macchine figurano anche ruote di mulino, tratte da impianti dello Stato pontificio oppure schizzi con nuove idee; i congegni di trasmissione sono eguali nei mulini e nelle macchine da sollevamento. Il disegno U 1504 A r<sup>104</sup> del Gabinetto dei disegni e delle stampe degli Uffizi a Firenze (ill. 18) mostra sulla sinistra una ruota di sollevamento azionata da calcanti; la didascalia autografa dice: "Rota larga palmi 9 lo votorano tre omeni aparo Alta palmi 40 La curva ovvero botte alto palmi 8". Il diametro della ruota è circa 9 metri e possiamo osservare la similitudine con la grande ruota raffigurata da Coecke. La "botte" è il cilindro sul quale si avvolgono le funi; il suo diametro eguaglia l'altezza della figurina che si vede nella ruota. Il disegno a destra ha la seguente spiegazione: "Questo bue camina sempre per uno verso e una cassa del peso va in su e l'altra torna in giù! Ma quando uno dei pesi è salito in alto bisogna abasare la vite perché la rocha pigli gli denti della rota da basso e così quelli dal alto". Questa macchina è una variante di quella di Brunelleschi<sup>105</sup>, che già comprendeva il congegno a vite per invertire il verso di rotazione della macchina senza invertire il giro del bue. Infine, il particolare in alto a destra reca la seguente spiegazione: "li denti della rota dentata sono rullitti". Anche questa è una innovazione di Brunelleschi che fu analizzata da Leonardo da Vinci<sup>106</sup>. Gustina Scaglia ha osservato che Antonio da Sangallo il Giovane preferì come motori ruote azionate da calcanti e argani azionati da cavalli<sup>107</sup>.

Un foglio di Giovan Francesco da Sangallo rappresenta le macchine usuali per i cantieri ordinari, per il sollevamento e il trasporto, U 3951 A r<sup>108</sup> (ill. 19). Le didascalie sui carri rappresentati nella parte destra precisano due volte il territorio del loro impiego; in alto: "Modi



Fig. 430. — Paranco ordinario a sei carrucole.

20. Daniele Donghi, *paranco ordinario a sei carrucole* (da D. Donghi, *Manuale dell'architetto*, Torino 1905, fig. 430).

da mettere pesi in su lle chara a uso di Roma”; in basso: “A uso di Roma a chavagli”. Fu copiato da un disegno di Giuliano intorno al 1530<sup>109</sup>. Sulla parte sinistra campeggia un falcone, azionato da un uomo mediante un argano caratterizzato da lunghi aspi: il manovratore abbraccia l'aspo tra i gomiti e le spalle per trascinarlo. Le taglie del paranco comprendono due girelle ciascuna. Il carico è un blocco squadrato sollevato mediante un'olivella. Il punto di sospensione del carico non è fisso ma può scorrere sulla mensola del falcone, mediante un'amanti-glio, al fine di effettuare spostamenti di precisione nella posa in opera. Infatti, la mensola non è orizzontale ma inclinata e in discesa dal punto di sospensione al palo dell'antenna; sopra la mensola è disteso un paranco la cui taglia fissa è vincolata all'estremità superiore dello sbalzo mentre la taglia mobile può scorrere sulla mensola ed è mossa da una ruota a pioli che sta al piede dell'antenna: è la taglia mobile che sposta il punto di sospensione in avanti e torna indietro per gravità. In alto a sinistra c'è un particolare con questo secondo paranco visto dall'alto. Durante la manovra l'antenna non si inclina ma resta in posizione fissa mediante quattro funi, “venti” che ne vincolano la sommità. Un solo uomo può manovrare questa gru. Sulla destra dello stesso foglio, in alto c'è un carro a due ruote, con il piano da carico inclinato: un uomo è intento a issare un blocco mediante un verricello che è solidale alle stanghe del timone del carro. Sulle stesse stanghe, dalla parte opposta, sono evidenti degli uncin, per aggiungere un cavallo mediante finimenti illustrati in un particolare in calce al foglio. Sotto il carro c'è un particolare del verricello con le

chiavi “di ferro” per fissare l'asse del verricello alle stanghe. Invece, nel disegno in basso, un carro simile è già aggiogato ed è pronto per il carico; la macchina di sollevamento è una capra a tre zampe con paranco e verricello. Il particolare del paranco è estratto da questo disegno ed è riproposto presso la piegatura del foglio.

Alla fine del Cinquecento, a Roma, la trasportazione dell'obelisco vaticano davanti alla basilica di San Pietro fu un teatro di macchine. L'intera operazione fu registrata dall'architetto Domenico Fontana<sup>110</sup>, ideatore di macchine e castelli e direttore dei lavori. L'operazione cominciò il 30 aprile 1586 e terminò il 26 settembre<sup>111</sup>. Il peso dell'obelisco è stimabile in 400 tonnellate<sup>112</sup>: un'impresa degna della tradizione dell'architettura megalitica antica. Furono impiegati i seguenti mezzi: 40 argani, 907 uomini, 75 cavalli<sup>113</sup>. Nelle grandi incisioni del Fontana è possibile individuare le macchine impiegate: paranchi con taglie a due girelle, argani con quattro lunghissimi aspi che erano spinti da cavalli e alternativamente da gruppi di uomini.

Nella storia la ruota risulta la macchina semplice più potente. Nel mulino, nella noria, nella ruota calcatoria, sono impiegate ruote con congegni simili. A partire dal Medioevo, nella devozione cristiana, la similitudine di macchine con ruote, impiegate da artigiani diversi, promosse un'identità nel culto della medesima santa patrona: S. Caterina di Alessandria, 25 novembre<sup>114</sup>. Infatti una ruota, munita di lame affilate come rasoi, fu lo strumento del supplizio e per questo divenne la santa protettrice di mugnai, carradori, tornitori, vasai, arrotini, filatrici, barbieri per via delle lame, inoltre del tribunale ecclesiastico della Sacra Rota.

\*È utile fornire rapidamente alcune definizioni preliminari: si definisce macchina ogni strumento che trasforma una forza, in direzione, intensità, punto di applicazione.

Una macchina compie un lavoro: sposta una forza resistente per un certo spazio impiegando una forza motrice. Il vantaggio della macchina è l'impiego di una forza motrice minore della forza resistente. La potenza è il lavoro prodotto dalla macchina nell'unità di tempo. Una parte di lavoro prodotto dalla forza motrice serve a vincere gli attriti e gli ostacoli passivi ed è lavoro perduto. In una macchina, tanto minore è il lavoro perduto rispetto al lavoro utile, tanto maggiore è il suo rendimento. Una macchina semplice non è costituita da altre, in caso contrario è composta.

La leva è un'asta rigida che può ruotare intorno a un punto fisso, il fulcro. La forza motrice e la forza resistente sono applicate sull'asta.

La girella è un disco con una fune sulla circonferenza che può ruotare intorno al centro. Le forze sono applicate alle estremità della fune. Girella, puleggia, carru-

cola, sono sinonimi.

L'argano è un cilindro con una fune avvolta, girevole intorno all'asse. La forza resistente è applicata a un'estremità della fune. La forza motrice è applicata sulla circonferenza di una ruota, di maggior diametro, coassiale e solidale al cilindro. Questa macchina prende anche nome di asse nella ruota. La ruota può essere dotata di pioli e prende nome di 'lanterna'; può essere sostituita da una manovella oppure da manici infissi radialmente sull'asse detti aspi. Verricello e burbera sono sinonimi di argano con asse orizzontale, azionato a mano, per il sollevamento.

“Chiamasi taglia la riunione di più carrucole in una sola staffa: difficilmente però si trovano taglie con più di 4 girelle. Il paranco è l'accoppiamento di due o più taglie di cui alcune fisse e le altre mobili” (D. Donghi, *Manuale dell'architetto*, Torino 1905, I, 1, pp.214-215) (ill. 20). Le carrucole sono collegate da una fune. La taglia fissa viene vincolata in alto a un punto fisso di sospensione; la taglia mobile viene collegata in basso al peso da sollevare. La forza motrice è applicata all'estremità libera della fune che esce dalla taglia

fissa; la forza motrice fa equilibrio al peso quando la sua intensità è eguale al peso diviso per il numero dei tratti di fune che sostengono la taglia mobile. Il paranco può disporre di una sola fune o di più funi traenti che ne aumentano la portanza. Il paranco offre grande vantaggio ma bassa potenza.

Il piano inclinato consiste in un piano rigido non orizzontale sul quale sta un grave da innalzare. Durante lo spostamento il grave resta costantemente appoggiato: una parte del suo peso è quindi equilibrata dal piano stesso. La forza motrice necessaria aumenta secondo l'inclinazione.

Il cuneo è un prisma triangolare rigido, con un diedro molto acuto tra due facce eguali che sono i fianchi. Sulla terza faccia, opposta al diedro acuto, è applicata la forza motrice e i fianchi vincono la resistenza del mezzo da tagliare.

La vite consiste in un cilindro su cui è avvolto ad elica un verme o filettatura, di sezione rettangolare o triangolare. La rotazione della vite in una sede fissa provoca l'innalzamento o l'abbassamento di essa, come avviene rispettivamente nel martinetto per alzare pesi e nel torchio per

esercitare una pressione.

Sono considerate macchine semplici la leva, la girella, l'argano, il piano inclinato, il cuneo. Nella meccanica galileiana (Galileo Galilei, *Le mecaniche* [1593], in *Opere di Galileo Galilei*, a cura di F. Brunetti, Torino 1980, I, pp.137-187) le macchine semplici sono tutte riconducibili a due soli principi: la leva, il piano inclinato. Infatti, nella leva la forza applicata produce un momento cioè la moltiplicazione della forza per il suo braccio; il braccio è la distanza tra il punto di applicazione e il fulcro. Le macchine semplici che producono un momento sono la girella, l'argano, il paranco ed esse sono riconducibili al principio della leva. Invece, il cuneo è riconducibile al principio del piano inclinato. Nella vite la filettatura è un piano inclinato elicoidale mosso da una rotazione cioè da un momento. Infine, la fune stessa è stata considerata una macchina semplice (G. Castelfranchi, *Fisica sperimentale e applicata*, Milano 1944, I, p. 84); certamente l'impiego della fune fu fondamentale nei cantieri dell'antico Egitto (D. Arnold, *Building in Egypt. Pharaonic Stone Masonry*, New York - Oxford 1991, pp. 268-269).

1. P. Fleury, *La mécanique de Vitruve*, Caen 1993, pp. 96-112, figg. 13-15. I disegni sono stati pubblicati precedentemente in L. Callebaut, *Vitruve, De l'Architecture livre X*, avec la collaboration pour le commentaire de P. Fleury, Paris 1986, pp. 89, 96, 100.
2. Vitruvio, *De Architectura libri decem*, edidit Valentinus Rose, Lipsiae 1899, X, II 1-4.
3. *Ibid.*, X, II 3.
4. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], p. 101.
5. Vitruvio, *De architectura...*, cit. [cfr. nota 2], X, II 5-7.
6. *Ibid.*, X, II 7.
7. *Ibid.*, X, II 8-10.
8. *Ibid.*, X, II 10.
9. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], p. 104 nota 3; R. Bedon, *Les carrières et les carriers de la Gaule romaine*, Paris 1984, p. 137.
10. Donghi, *Manuale dell'architetto*, cit. [cfr. nota \*], pp. 192-193 e tabella XIII.
11. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], pp. 107-108. J.P. Adam, *A propos du triliton de Baalbek*, in "Syria", 54, 1977, pp. 31-63, figg. 3-4.
12. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], p. 111.
13. *Ibid.*, pp. 95-96, 143-144.
14. S. Ferri, *Vitruvio*, Roma 1960, pp. 3-4. P. Gros (a cura di), *Vitruvio, De Architectura*, traduzione e commento di A. Corso e E. Romano, Torino 1997. T. Howe, I. Rowland, *Vitruvius "Ten Books of Architecture"*, a new English Translation with Commentary and Illustrations, Cambridge 1999.
15. G. Lugli, *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*, Roma 1957, I, pp. 530-534.
16. Vitruvio, *De architectura...*, cit. [cfr. nota 2], V, X 2.
17. Lugli, *La tecnica edilizia romana...*, cit. [cfr. nota 15], I, pp. 327-329. E. Dolci, *Carrara cave antiche*, Carrara 1980, pp. 33-34.
18. M. Wilson Jones, *Designing the Roman Corinthian Order*, in "Journal of Roman Archaeology", 2, 1989, pp. 35-69, particolarmente cfr. la tavola sull'ordine dei templi corinzi di Roma, disegno di Mark Wilson Jones e Christine Simonis.
19. M. Santangelo, *Il Quirinale nell'antichità classica*, in "Atti della Pontificia Accademia Romana di Archeologia, Memorie", Serie III, V, 1941, pp. 77-217, particolarmente p. 158.
20. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], p. 28. Callebaut, *Vitruve, De l'Architecture...*, cit., [cfr. nota 1] pp. IX-XI.
21. A.G. Drachmann, *The Mechanical Technology of Greek and Roman Antiquity*, Copenhagen 1963, pp. 19-140.
22. B. Carra de Vaux, *Les Mécaniques de Héron d'Alexandrie*, in "Journal Asiatique", I, pp. 386-472; II, pp. 152-192, 227-269, 461-514. Ristampa: introduzione par D.R. Hill, commentaires par A.G. Drachmann, Paris 1988.
23. O. Neugebauer, *Über eine Methode zur Distanzbestimmung Alexandria-Rom bei Heron*, in "Det Kgl. Danske Videnskaberne Selskab. Historik-filologiske Meddelelser", XXVI, 2, 1938, particolarmente pp. 21-24.
24. F. Hulstsch, *Pappi Alexandrini collectionis quae supersunt*, III, Berolini 1878, pp. 1022-1135. L. Nix, W. Schmidt, *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia*, II fasc. I, Lipsiae 1900, pp. 256-299.
25. Drachmann, *The Mechanical Technology...*, cit. [cfr. nota 21], p. 21.
26. Bibliothek der Rijksuniversiteit, Leiden, *cod. Or.* 51.
27. A. Martini, *Manuale di metrologia antica e moderna*, Torino 1883, p. 862.
28. M. Claggett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison-Wisconsin 1959, ed. italiana Milano 1972, pp. 69-70.
29. C. Singer, E.J. Holmyard, A.R. Hall, T.I. Williams (a cura di), *A history of Technology*, Oxford 1956, ed. italiana Torino 1962, II, *sub voce*, particolarmente pp. 120-121, 221, 640-641, 656-657.
30. Biblioteca Apostolica Vaticana, *cod. Vaticanus Latinus 3225*, fol. 13r D.H. Wright, *1. Virgilio. Opere*, in M. Buonocore (a cura di), *Vedere i Classici. L'illustrazione libraria dei testi antichi dall'età romana al tardo medioevo*, catalogo della mostra Città del Vaticano (Musei Vaticani 9 ottobre 1996 - 19 aprile 1997), Roma 1996, pp. 142-149; R. Bianchi Bandinelli, *Vergilius Vaticanus 3225 e Iliade Ambrosiana*, in "Nederlands Kunsthistorisch Jaarboek", 5, 1954, pp. 225 sgg., ristampato in id., *Archeologia e Cultura*, Milano-Napoli 1961, pp. 328-342.
31. F. Coarelli, *Roma sepolta*, Roma 1984, pp. 166-179. G. Ambrosetti, *Monumento degli Haterii*, in *Enciclopedia dell'Arte Antica*, III, Roma 1960, pp. 112-115. Adam, *A propos du triliton...*, cit. [cfr. nota 11], pp. 40-41. F. Sinn, K.S. Freyberger, *Die Grabdenkmäler 2. Die Ausstattung des Hateriergrabes*, Mainz am Rhein 1996, pp. 51-59: datano il rilievo intorno al 120 d.C.
32. Fleury, *La mécanique...*, cit., [cfr. nota 1] pp. 124-127.
33. Le osservazioni qui esposte sulle funi e sulla taglia fissa sono originali rispetto agli studi precedenti. C. Daremberg, E. Saglio, *Dictionnaire des Antiquités grecques et romaines*, Paris 1877-1919, V, p. 1466; W. Sackur, *Vitruv, Technik und Literatur*, Berlin 1925, pp. 51-54; F. Kretzschmer, *La technique romaine*, Bruxelles 1966, pp. 25-26; Adam, *A propos du triliton...*, cit. [cfr. nota 11], pp. 40-41. J.W. Shaw, *A double sheaved pulley-block from Kenchreai*, in "Hesperia", 36, 1967, pp. 389-401; B. Frau, *Tecnologia greca e romana*, Gruppo archeologico Romano, Roma 1987, pp. 137-138; Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 11], pp. 124-127; Sinn, Freyberger, *Die Grabdenkmäler 2...*, cit. [cfr. nota 31], pp. 52-53, 56, note 12-16, con bibliografia.
34. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], pp. 107, 132, 135.
35. J.J. Coulton, *Lifting in early Greek Architecture*, in "Journal of Hellenic Studies", XCIV, 1974, pp. 1-19, particolarmente p. 13.
36. C. Wescher, *La poliorcétique des Grecs*, Paris 1897, pp. 135-193. Schneider, *Griechische Poliorcetik*, Berlin 1908. I. R.T. Ridley, *The fate of an architect: Apollodoros of Damascus*, in "Athenaeum", 67, 1989, pp. 551-565. P.H. Blyth, *Apollodoros of Damascus and the Poliorcetica*, in "Greek Roman and Byzantine Studies", 33, 1992, pp. 127-158; A. La Regina (a cura di), *L'arte dell'assedio di Apollodoro di Damasco*, Roma Milano 1999.
37. T. Reinach, *A qui sont dédiées les Poliorcétiques d'Apollodore?*, in "Revue des Études Grecques", VIII, 1895, pp. 198-202. Il codice del cosiddetto Erone di Bisanzio [cfr. note 46,47] contiene un'epitome di Apollodoro ove espressamente è citato l'imperatore Adriano, *cod. Vat. Gr.* 1605, fol. I r, righe 11-13:  $\alpha\lambda\lambda\prime\ \text{'}\text{Απολλοδόρου πρὸς Ἀδριανὸν αὐτοκρατορα συνταχθέντα πολιορκητικὰ}$ . Ringrazio per questo richiamo il prof. Adriano La Regina.
38. E. Lacoste, *Les Poliorcétiques d'Apollodore*, in "Revue des Études Grecques", III, 1890, pp. 234-281.
39. Flavio Giuseppe, *Bellum Iudaicum*, VII 8, 5. Flavio Giuseppe, *La guerra giudaica*, a cura di G. Vitucci, Milano 1974, II, pp. 486-487.
40. Dione Cassio, *Historia Romana*, LX-VIII 13. I passi di Dione Cassio relativi alle guerre daciche sono stati tradotti da Adriano La Regina in S. Settis, A. La Regina, G. Agosti, V. Farinella, *La Colonna Traiana*, Torino 1988, pp. 13-17.
41. Gr. G. Tocilescu, *Fouilles et Recherches Archéologiques en Roumanie*, Bucarest 1900, p. 140-141.
42. Settis, La Regina, Agosti, Farinella, *La Colonna...*, cit. [cfr. nota 40], tavv. 179-180, foto di Eugenio Monti.
43. Procopio di Cesarea, *De Aedificiis*, IV 6, 13.
44. G. Martines, *La struttura della Colonna Traiana: un'esercitazione di meccanica alsandrina*, in "Prospettiva", 32, 1983, pp. 60-71; id., *Note di tecnica su Apollodoro*, in A. La Regina, *L'arte dell'assedio...*, cit. [cfr. nota 36], pp. 91-105. L. Lancaster, *Building Trajan's Column*, in "American Journal of Archaeology", 103, 3, 1999, pp. 419-439. G. Martines, *L'architettura*, in John Scheid (a cura di), *La Colonne de Marc Aurèle*, Paris (in corso di stampa).
45. A. Dain, *Les stratèges byzantins*, in "Travaux et Mémoires", 2, 1967, pp. 317-391; M.A. Tomei, *La tecnologia nel tardo impero romano: le macchine da guerra*, in "Dialoghi di Archeologia", 1, 1982, pp. 63-88; F.F. Repellini, *Tecnologie e macchine*, in A. Momigliano, A. Schiavone (a cura di), *Storia di Roma*, Torino 1989, IV, pp. 323-368.
46. Dain, *Les stratèges byzantins*, cit. [cfr. nota 45], p. 358; id., *La tradition du texte d'Héron de Byzance*, Paris 1933.
47. K.K. Müller, *Handschriftliches zu den Poliorcetica und der Geodäsie des sogenannten Hero*, in "Rheinisches Museum für Philologie", XXXVIII, 1883, pp. 454-463; M. D'Agostino, *23. Erone, trattati sulle macchine da guerra e sulla geodesia*, in Buonocore, *Vedere i Classici...*, cit. [cfr. nota 30], pp. 209-210. *Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia*, III, *Rationes dimetiendi et commentatio Dioptrica*, recensuit Hermann Schöne, Leipzig 1903, pp. 187-315.
48. Il testo relativo alle figure è in Schneider, *Griechische...*, cit. [cfr. nota 36], II, pp. 72-76; le citazioni sono tradotte dalle righe 271, 3-271, 9.
49. O. Lendle, *Texte und Untersuchungen zum technischen Bereich der antiken Poliorcetik*, Wiesbaden 1983, pp. 107-113.
50. *Ibid.*, p. 113.
51. Si veda nota 29.
52. E. Agazzi (a cura di), *Il concetto di progresso nella scienza*, Milano 1976; L. Russo, *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, Milano 1996. P. M. Schuhl, *Perché l'antichità classica non ha conosciuto il "macchinismo"?*, in A. Koyré, *Dal Mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino 1992, pp. 115-134.
53. Ateneo, *Dipnosophistarum libri XV*, recensuit G. Kaibel, I, Lipsiae 1887, p. 642.
54. Vitruvio, *De architectura...*, cit. [cfr. nota 2], X, VI; V, XII 5.
55. Daremberg, Saglio, *Dictionnaire des Antiquités...*, cit. [cfr. nota 33], III, 2, p. 1859; A. Ciarallo, E. De Carolis (a cura di), *Homo Faber: Natura, scienza e tecnica nell'antica Pompei*, Catalogo della mostra (Napoli Museo Archeologico Nazionale 27 marzo - 18 luglio 1999), Milano 1999, pp. 321-322.
56. Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], p. 163. A. Y. Al Hassan, D.R. Hill, *Islamic Technology*, Cambridge-Paris 1988, pp. 242-243.
57. Roberto Valturio dispone la sua coecla orizzontalmente; è evidentemente una ricostruzione grafica non suffragata dall'esperienza: *Le macchine di Valturio*, presentazione di S. Ricossa, Torino 1988, tav. XV, pp. 127-135.
58. Sono grato per questa indicazione al professor Howard Burns: L. Puppi, *Andrea Palladio*, Milano 1973, p. 380 n. 102. G. Ceredi, *Tre discorsi sopra il modo di alzar acque da luoghi bassi*, Parma 1567, pp. 17-18. La citazione del Ceredi è riportata in G. Zorzi, *I disegni delle antichità di Andrea Palladio*, Venezia 1959, p. 9 nota 59.
59. "Annales d'Histoire économique et sociale", VII, 1935, pp. 538-563. Questo

- saggio è stato tradotto e pubblicato in M. Bloch, *Lavoro e tecnica nel Medioevo*, Bari 1969, pp. 73-110.
60. *Ibid.*, p. 82.
61. *Ibid.* Sul mulino ad acqua di Vitruvio: Fleury, *La mécanique...*, cit. [cfr. nota 1], pp. 171-177. Sul mulino: R.J. Forbes, *Energia motrice*, in Singer, Holmyard, Hall, Williams, *A History of Technology*, cit. [cfr. nota 29], II, pp. 603-632; M.A. Tomei, *La tecnologia nel tardo impero romano: sviluppo e diffusione di alcune tecniche nel settore della produzione civile*, in "Archeologia Classica", XXXIII, 1981, pp. 273-302.
62. Bloch, *Lavoro e tecnica...*, cit. [cfr. nota 59], p. 83; p. 81.
63. Bibliothèque nationale de Paris, *cod. Fr. 19093*, fol. 22 v *Album de Villard de Honnecourt*, manuscrit publié en fac-simile annoté par J.B.A. Lassus, Paris 1858, p. 171 e pl. XLIII. H.R. Hahnloser, *Villard de Honnecourt*, I ed. Wien 1935, Graz 1972, pp. 133-134, 370; P. Portoghesi, *Macchine gotiche: Villard de Honnecourt vi saluta e chiede a tutti quelli che lavorano nelle diverse arti di cui si tratta nel suo taccuino di ricordarsi di lui*, in "Civiltà delle macchine", 4, 1954, pp. 17-20, particolarmente p. 19; id., *Infanzia delle macchine*, Roma 1965, cap. III; B. Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, Paris 1964, II ed. italiana, Milano 1980, p. 26; R. Bechmann, *Villard de Honnecourt*, Paris 1991, pp. 278-286.
64. *Decimi Magni Ausonii Burdigalensis Opuscula*, edidit Sextus Prete, Leipzig 1978: *Mosella*, vv. 361-364.
65. Archivio della Badia di Montecassino, *cod. 132, 1023*, Rabano Mauro, *De Origine Rerum*, p. 418: la miniatura è intitolata *De Marmoribus* e presenta due segatori in piedi, intenti a segare una lastra da un paralelepipedo, con una sega a lama intelaiata come quella da falegname; A.M. Amelli, *Miniature sacre e profane dell'anno 1023 illustranti l'enciclopedia di Rabano Mauro*, Montecassino 1896, tav. CXIX; E.A. Loew, *The Beneventan Script. A History of the Sout Italian Minuscule*, Second Edition enlarged by V. Brown, Roma 1980, II, pp. 70-71 con bibliografia.
66. Al-Hassan, Hill, *Islamic Technology* cit. [cfr. nota 56], pp. 38-39.
67. P. Cuneo, *Noria*, in D. Jones (a cura di), *Il teatro delle acque*, Roma 1992, pp. 51-68; G.S. Colin, *La noria marocaine et les machines hydrauliques dans le monde arabe*, in "Hespéris", XIV, 1932, pp. 22-60.
68. J. Fitchen, *The Construction of Gothic Cathedrals. A Study of Medieval Vault Erection*, Oxford 1967; P. Du Colombier, *Les chantiers des cathédrales. Ouvriers-Architectes-Sculpteurs*, Paris 1973; R.Recht (a cura di), *Les Bâtisseurs des Cathédrales gothiques*, catalogo della mostra (Strasbourg Ancienne Douane 3 settembre - 26 novembre 1989), Strasbourg 1989; W. Müller, *Grundlagen gotischer Bautechnik*, München 1990. R. Cassanelli (a cura di), *Cantieri medioevali*, Milano 1995.
69. P. Rockwell, *Preliminary study of the carving techniques on the Column of Trajan*, in P. Pensabene (a cura di), *Marmi antichi*, "Studi Miscellanei", 26, 1981-1983, pp. 101-111. id., *Lavorare la pietra*, Roma 1989, pp. 249-258.
70. A. Claridge, *Le scanalature delle colonne*, in L. Cozza (a cura di), *Tempio di Adriano*, Lavori e studi di archeologia pubblicati dalla Soprintendenza Archeologica di Roma, I, Roma 1982, pp. 27-30.
71. P. Galluzzi, *Gli ingegneri del Rinascimento da Brunelleschi a Leonardo da Vinci*, catalogo della mostra Firenze Palazzo Strozzi 22 giugno 1996 - 6 gennaio 1997, Firenze, 1996, p. 21.
72. Du Colombier, *Les chantiers de cathédrales...*, cit. [cfr. nota 68], p. 26.
73. Bibliothèque Nationale, Paris, *cod. Fr. 247*, fol. 163 r.
74. P. Durrieu, *La légende et l'histoire de Jean Fouquet*, in "Annuaire - Bulletin de la Société de l'Histoire de France", 1907, pp. 111-126. S. Lombardi, *Jean Fouquet*, Firenze 1983, pp. 177-185.
75. Antonio Averlino detto il Filarete, *Trattato di Architettura*, a cura di A. M. Finoli e L. Grassi, Milano 1972, I, p. 265. *Le opere di Giorgio Vasari*, con nuove annotazioni e commenti di Gaetano Milanesi, Firenze 1906, II, *Antonio Filarete e Simone*, p. 461.
76. Galluzzi, *Gli ingegneri del Rinascimento...*, cit. [cfr. nota 71], pp. 104-105, 114-115.
77. G. Dehio, G. von Bezold, *Die kirchliche Baukunst des Abendlandes*, Hildeseim 1892-1901, Atlas IV, taf. 412 Cattedrale di Reims; Atlas V, taf. 481 e 483 Cattedrale di Strasburgo.
78. L. Grodecki, *Architettura gotica*, Milano 1978, p. 204.
79. Si veda il contributo della professoressa Daniela Lamberini in questo stesso volume. S. Di Pasquale, *Léonard, Brunelleschi et les machines de chantier*, in P. Galluzzi (a cura di), *Léonard, Vinci ingénieur et architecte*, catalogo della mostra (Montréal Musée de beaux-arts 22 mai - 8 novembre 1987, Montréal 1987), pp. 163-181.
80. Il professor Paolo Galluzzi ha dedicato a Brunelleschi e agli ingegneri del Rinascimento tre grandi mostre con rispettivi cataloghi: Galluzzi, (a cura di), *Léonard de Vinci...*, cit. [cfr. nota 79]; id. (a cura di), *Prima di Leonardo. Cultura delle macchine a Siena nel Rinascimento*, catalogo della mostra Siena Magazzini del Sale 9 giugno - 30 settembre 1991, Milano 1991; id., *Gli ingegneri del Rinascimento...*, cit. [cfr. nota 71].
81. *Ibid.*
82. D. Lamberini, *La fortuna delle macchine senesi nel Cinquecento*, in Galluzzi, (a cura di), *Prima di Leonardo...*, cit. [cfr. nota 79], 1991, pp. 135-146: citazioni da p. 141.
83. J. Rykwert, *I committenti e i loro edifici. Sigismondo Malatesta di Rimini e il Tempio Malatestiano*, in J. Rykwert, A. Engel (a cura di), *Leon Battista Alberti*, catalogo della mostra (Mantova Palazzo Te, 10 settembre - 11 dicembre 1994), Milano 1994, pp. 378-381.
84. L. Bertolini, *Basinio da Parma*, in Rykwert, Engel, *Leon Battista Alberti...*, cit. [cfr. nota 83], pp. 450-451.
85. D. Lamberini, *Costruzione e cantiere: le macchine*, in H. Millon, V. Magnago Lampugnani (a cura di), *Rinascimento da Brunelleschi a Michelangelo*, Milano 1994, pp. 478-490, in particolare pp. 485-486 nn. 97-98.
86. *Ibid.*, p. 486.
87. Donghi, *Manuale dell'architetto* cit. [cfr. nota \*], p. 231, ill. 455.
88. Lamberini, *Costruzione e cantiere...*, cit. [cfr. nota 85], pp. 479-480; K. Weil, G. Brandt, *Il rapporto tra scultura e architettura nel Rinascimento*, in Millon, Magnago Lampugnani, (a cura di), *Rinascimento da Brunelleschi...*, cit. [cfr. nota 85], pp. 87-95.
89. Donghi, *Manuale dell'architetto* cit. [cfr. nota \*], p. 232.
90. Biblioteca Apostolica Vaticana, Gabinetto delle stampe, *Collezione disegni Thomas Ashby*, n. 329. D. Bodard, *Dessins de la Collection Thomas Ashby à la Bibliothèque Vaticane*, Città del Vaticano 1975, p. 113; R. Keaveney, *Ottantuno disegni e acquerelli della Collezione Thomas Ashby*, in id. (a cura di), *Vedute di Roma dalla Biblioteca Apostolica Vaticana, collezione Thomas Ashby*, London 1988, pp. 57-61.
91. C. L. Frommel, *La fabbrica eterna San Pietro. Bramante e Raffaello*, in Millon, Magnago Lampugnani (a cura di), *Rinascimento...*, cit. [cfr. nota 85], pp. 599-632., in particolare p. 623 n. 323; id., *San Pietro. Storia della sua costruzione*, in C.L. Frommel, S. Ray, M. Tafuri (a cura di), *Raffaello architetto*, catalogo della mostra (Roma Campidoglio 29 febbraio - 15 maggio 1984, Milano 1984), pp. 241-310, in particolare p. 303; concordemente: H. Saalman, *Die Planung neu St. Peters*, in "Münchener Jahrbuch der bildenden Kunst", XL, 1989, pp. 103-146, fig. 7.
92. N. Dacos, *Les premières sanguines des peintres des anciens Pays-Bas*, in "Incontri", 1, 1994, pp. 11-20, particolarmente pp. 13-17. ead., *Pieter Coecke, Vue du nouveau Saint-Pierre en construction prise du côté sud-ouest*, in *Fiamminghi a Roma 1508-1608. Artistes des Pays-Bas et de la Principauté de Liège a Rome à la Renaissance*, catalogo della mostra Bruxelles, Palais des Beaux Arts 24 février-21 mai 1995, Roma, Palazzo delle Esposizioni 7 juin-4 septembre 1995, Bruxelles 1995, pp. 155-156. C. Thoenes, *S. Pietro: storia e ricerca*, in G. Spagnesi (a cura di), *L'architettura della basilica di San Pietro. Storia e costruzione*. Atti del convegno internazionale di studi (Roma, Castel Sant'Angelo 7-10 novembre 1995), "Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura", 25-30, 1995-1997, p. 28, nota 21.
93. Frommel, *La fabbrica eterna San Pietro...*, cit. [cfr. nota 91], p. 623.
94. E. Borea, *Vicenda di Polidoro da Caravaggio*, in "Arte Antica e Moderna", 13-16, 1961, pp. 211-227. A. Marabottini, *Polidoro da Caravaggio*, Roma 1969, I, pp. 46-56. R. Quednau, *Die Sala di Costantino*
- in *Vatikanischen Palast*, Hildeseim - New York 1979, pp. 472-493. N. Dacos, *Ni Polidoro ni Peruzzi: Maturino*, in "Revue de l'Art", 57, 1982, pp. 9-28, particolarmente p. 14.
95. G. Martines, *La Colonna Traiana e i chiarioscuri della Sala di Costantino in Vaticano: note sul monocromo*, in "Bollettino d'Arte", supplemento al nn. 35-36, I, pp. 31-36.
96. Quednau, *Die Sala di Costantino...*, cit. [cfr. nota 94], pp. 481-484. Frommel, *San Pietro. Storia...*, cit. [cfr. nota 91], p. 298.
97. C.L. Frommel, *Il cantiere di San Pietro prima di Michelangelo*, in J. Guillaume (a cura di), *Les chantiers de la Renaissance*, Actes de Colloque tenu à Tours en 1983-1984, Paris 1991, pp. 175-190, in particolare p. 179.
98. Quednau, *Die Sala di Costantino...*, cit. [cfr. nota 94], p. 483.
99. *Ibid.*, pp. 472, 859 documento 61b.
100. P.S. Bartoli, *Monocromata in Costantiniana Vaticani Aula*, Romae, s.d., tav. 6: nell'incisione, che è in controparte, le ruote sono due con un asse unico, con una struttura inclinata tra esse e appoggiata sull'asse.
101. A. Schiavo, *Il palazzo della Cancelleria*, Roma 1963, p. 156. Frommel, *Il cantiere di San Pietro...*, cit. [cfr. nota 97], p. 181.
102. *Ibid.*, pp. 178, 181.
103. G. Scaglia, *Drawings of Machines, Instruments, and Tools*, in C.L. Frommel, N. Adams (a cura di), *The Architectural Drawings of Antonio da Sangallo the Younger and his Circle*, I, New York 1994, pp. 81-97.
104. *Ibid.*, *U 1504 recto*, pp. 250-252, da cui sono prese le trascrizioni del testo del disegno, qui riportate.
105. Galluzzi, *Gli ingegneri del Rinascimento...*, cit. [cfr. nota 71], pp. 100-101.
106. *Ibid.*
107. Scaglia, *Drawings of Machines...*, cit. [cfr. nota 71], *U 852 A recto; U 1504 recto*, rispettivamente pp. 155, 251.
108. *Ibid.*, *U 3951 A recto*, pp. 266-267, da cui sono prese le trascrizioni del testo del disegno, qui riportate.
109. *Ibid.*, p. 83.
110. Domenico Fontana, *Della trasportazione dell'obelisco vaticano*, Roma 1590.
111. C. D'Onofrio, *Gli obeliscchi di Roma*, Roma 1967, pp. 83, 88; id., *Gli obeliscchi di Roma*, Roma 1992, pp. 162, 168.
112. Frau, *Tecnologia greca e...*, cit. [cfr. nota 33], p. 139.
113. D'Onofrio, *Gli obeliscchi...*, cit., 1967, pp. 81, 84. id., *Gli obeliscchi...*, cit. [cfr. nota 111], 1992, pp. 160, 162.
114. L. Réau, *Iconographie de l'Art Chrétien*, Paris 1958, III 1, pp. 262-272, particolarmente p. 265.