GIOVANNI CANESTRINI

LEONARDO

COSTRUTTORE
DI MACCHINE E DI VEICOLI



TUMMINELLI & C. - EDITORI
MILANO - ROMA

CENTRALE

BIBLIOTECA NAZIONALE CENTRALE
19
u
232
FIRENZE

LEONARDO

COSTRUTTORE DI MACCHINE E DI VEICOLI

GIOVANNI CANESTRINI

LEONARDO

COSTRUTTORE
DI MACCHINE E DI VEICOLI

BIBLIOTECA NAZIONALE CENTRALE
16 DIC 48
FIRENZE

TUMMINELLI & C. - EDITORI
MILANO - ROMA

PROPRIETÀ ARTISTICA E
LETTERARIA RISERVATA

19. u. 232

STAMPATO IN ITALIA 1939 - XVII

ISTITUTO ROMANO DI ARTI GRAFICHE
DI TUMMINELLI & C. - EDITORI
MILANO - ROMA

Ai miei genitori.

I°

LA MACCHINA NELLA CONCEZIONE VINCIANA

L'imponente contributo che il genio italiano ha dato nei secoli alla civiltà nel campo delle arti e delle lettere, lo splendore del nostro patrimonio artistico, la potenza militare e politica di Roma, sono tutti fattori che hanno indubbiamente oscurato — almeno fino al secolo scorso — l'opera fondamentale e decisiva svolta in ogni tempo dai nostri scienziati.

La povertà delle fonti storiche, ma anche in parte la indifferenza o la noncuranza degli italiani di ieri, hanno contribuito a diffondere l'opinione che, sulla nostra bella terra, solo l'arte e la poesia potessero allignare. E del nostro popolo se n'è fatto un popolo di poeti e di artisti o, risalendo all'Impero Romano, di accorti statisti e di grandi capitani.

E' ancor oggi radicata la convinzione che la scienza e la tecnica — nate tra i popoli orientali e potenziate dal mondo ellenico — non abbiano trovato in Italia che un terreno parzialmente favorevole, ed ab-

biano successivamente prosperato, per merito precipuo degli arabi, nei centri di cultura dell'Occidente.

Ora, mano a mano che si approfondiscono le ricerche storiche e che si intensificano gli studi sulla attività tecnica e scientifica degli italiani nelle diverse epoche, si rivela che questa terra di artisti e di poeti non solo diede vita ai più grandi scienziati e pensatori dell'umanità, ma generò e nutrì popolazioni altrettanto versate nelle arti che nella tecnica.

Non c'è dubbio ormai che gli etruschi, ad esempio, anche ammettendo che abbiano derivato in parte dai greci molte loro conoscenze, li hanno nettamente sopravanzati nel campo delle arti applicate e delle costruzioni, eccellendo in meccanica, in chimica, nelle costruzioni stradali ed edili, nella metallotecnica. Così è accertato che la scienza greca, eminentemente volta ai problemi metafisici ed alle ricerche teoriche, diviene scienza di osservazione e si sviluppa sul terreno sperimentale quando trasmigra nell'Italia meridionale. E basta appena ricordare che Archimede ed Archita, due dei più grandi meccanici dell'antichità, sono figli di questa nostra terra.

Dei Romani s'è detto e ripetuto che essi non diedero alcun contributo positivo allo sviluppo delle scienze; che disprezzarono anzi tutto ciò che era progresso intellettuale e scientifico; ma non è men vero, a questo proposito, che il giudizio degli storici



Leonardo da Vinci
(busto in terracotta, opera della bottega di G. F. Rustici)

va modificandosi sostanzialmente, con l'approfondirsi degli studi su quanto Roma ha fatto nel campo della tecnica e delle costruzioni. Le indagini più recenti rivelano che i romani non hanno solamente e semplicemente derivato dagli etruschi e dai greci la loro coltura, ma la hanno sviluppata, trasformata, divulgata, approfondita ed, attraverso l'unità dell'Impero, trasmessa a tutto l'Occidente.

È appunto dalla civiltà tecnica romana che si svilupperanno successivamente, e sempre prevalentemente in Italia, le scienze applicate e che si arriverà a Leonardo prima ed a Galileo poi, con i quali si afferma definitivamente il metodo scientifico moderno, ed a quel rinascimento delle scienze esatte ed applicate, che già nel XII secolo s'era iniziato nel nostro Paese.

Lo sfacelo dell'Impero di Roma aveva bensì arrestato il processo evolutivo della meccanica e delle costruzioni, ma rimanevano le traccie, talora imponenti, di quanto i romani avevano fatto in questo campo. Fatto più che scritto, perchè in realtà, portati dal loro spirito essenzialmente realizzatore, più all'azione che alla speculazione, i romani poche opere hanno lasciato — per quanto si sappia — nel campo tecnico e scientifico. Se il crollo di tutto il sistema politico ed economico dell'impero ha necessariamente distratto — o addirittura soppresso — ogni attività

tecnica in tutto l'Occidente, rimangono peraltro ancora molte vestigia delle costruzioni romane a provarci che, anche nel campo delle macchine e delle applicazioni meccaniche, Roma doveva avere conoscenze ben più vaste di quelle che normalmente le si concedono, appoggiandosi sui testi e sui riferimenti noti. Le sue macchine da costruzione e da guerra, i suoi veicoli, le sue navi, i suoi impianti idraulici, le sue applicazioni tecnologiche, i suoi sistemi di lavorazione, se non ci sono tramandati in opere scritte, sono però rimasti nella pratica degli artigiani e degli operai.

Giustamente osserva Guglielmo Libri, che non sufficientemente s'è rilevato questo ruolo conservatore che sostengono nella storia gli artigiani. Se le opere scritte possono andare distrutte o perdute, le applicazioni utili e i trovati dell'ingegno non si perdono, ma si tramandano di padre in figlio, di generazione in generazione.

E questo fenomeno non si può trascurare nello studio della evoluzione delle arti meccaniche ed applicate. Bisogna andare quindi molto cauti nell'assegnare priorità inventive, nell'esprimere giudizi sull'opera dei diversi autori, o sullo sviluppo delle diverse invenzioni, tanto più che — prima della scoperta della stampa ed anche successivamente — il più sospettoso riserbo circondava le scoperte, le applicazioni, i sistemi di lavorazione di questi antichi

meccanici. Lo stesso Leonardo ha custodito gelosamente i suoi studi ed i suoi disegni, ed ha probabilmente impiegato scritture ermetiche od abbreviate per evitare che altri potessero impossessarsi delle sue invenzioni.

L'esempio di Leonardo è istruttivo a questo riguardo. Non poche delle invenzioni, delle scoperte e delle applicazioni da lui fatte, fino ai nostri giorni vennero ad altri attribuite; del pari non pochi ritrovati, che certamente non gli appartengono, a lui vennero, od ancora vengono, fatti risalire. Quando si consideri la imponente opera di Leonardo meccanico e costruttore di macchine non si può fare astrazione nè dall'ambiente nel quale viveva, nè della attività di quelli che lo precedettero e che fu certamente molto importante ed estesa, anche se la mancanza di documentazioni adeguate, la faccia sembrare limitata e scarsamente significativa.

Nel XIV secolo, ad esempio, notevoli furono i progressi della meccanica e delle scienze applicate che si rivelano in modo particolare nel campo delle macchine da guerra, dell'arte di costruire cannoni di grosso calibro e di grande portata, in quello delle imponenti costruzioni del Rinascimento; in quello dell'arte della tessitura, in quello delle macchine idrauliche, in quello infine degli orologi. Di pari passo fiorivano le scienze esatte e, sotto l'influsso

di Leonardo Fibonacci, ovunque in Italia s'ebbero centri di studi ed insigni studiosi.

Il movimento innovatore dell'umanesimo, che s'era iniziato subito dopo il mille, non poteva non ripercuotersi anche nel campo scientifico, ed in quello particolare della tecnica. Osserva Gabrielle Sèailles, che l'antichità non ebbe solamente poeti oratori e filosofi, ma anche scienziati, meccanici, ingegneri. Non si studiano e si traducono — in quest'epoca — solamente i testi letterari e filosofici, ma anche le opere di scienza. Si copiano, si trascrivono, si divulgano, si commentano manoscritti dimenticati nelle biblioteche. Archimede, Euclide, Erone, Pappo, Vitruvio costituiscono la base di questa ripresa degli studi scientifici, ma è specialmente Aristotele che trionfa con la filosofia scolastica nel XIII secolo.

Ma di Aristotele e di Archimede, più che i metodi di osservazione, più che lo spirito realistico, che preludono alla scienza sperimentale, si seguono e si riprendono le speculazioni matematiche e le trattazioni dialettiche. E sono in effetto le teorie aristoteliche che regneranno sovrane, mentre dimenticato o quasi è Archimede, al quale in realtà deve collegarsi l'evoluzione della meccanica moderna. Ed è da questo genio, nato e nutrito in terra italiana, che Leonardo si sente particolarmente attratto. Le frequen-

tissime citazioni ed i numerosi riferimenti che egli ne fa nelle sue annotazioni provano con quanta premurosa attenzione egli abbia consultato e meditato le opere del grande siracusano. « Borges ti farà avere Archimede dal vescovo di Padova e Vitellozzo quello da il Borgo S. Sepolcro » scrive nel Ms. L 2, e ancora: « Archimede è intero appresso il fratel di Monsignor di S. Giusta in Roma » nel Cod. Atlantico 349 Vf.

Altre citazioni riguardano Euclide, Erone, Alchino od El-Kindi, Giordano Nemorario, Biagio Pelacani, Thabit. Leonardo conosce pure certamente le opere di Vitruvio, di Plinio, di Celso, di Ippocrate, di Lucrezio e poi quelle di Alberto di Sassonia e dei dottori della Scuola di Oxford, oltre a quelle dei commentatori italiani; ma la sua meccanica si ispira fondamentalmente ad Archimede.

Sembra quasi che una misteriosa corrente di pensiero esista fra questi due grandi genii della meccanica, così affini nella concezione e nella impostazione dei problemi. Ma se Leonardo attinge agli antichi testi, se prima di guardare avanti, si volge al passato, conserva peraltro integra la sua indipendenza di giudizio e di critica.

« Voi speculatori, non vi fidate delli autori che hanno, sol co' l'immaginazione, voluto farsi interpreti fra la natura e l'omo ma sol di quelli che, non coi

cenni della natura, ma co' gli effetti delle sue esperienze hanno esercitato i loro ingegni », scrive ergendosi contro i canoni della scienza aristotelica accolti dalla Chiesa e pedissequamente seguiti negli ambienti culturali del suo tempo, dai quali egli si tenne sdegnosamente lontano.

Dal contrasto fra scolastica ed umanesimo nasce il miracolo di Leonardo e s'aprono gli orizzonti alla nuova scienza. Mentre i suoi contemporanei si perdono in sterili polemiche, in astruse speculazioni od in superflui commenti sull'opera degli antichi, Leonardo penetra con l'acuta lama del suo genio nel corpo inerte e greve di tutta una tradizione che durava da secoli, « ed inizia la più vasta inchiesta scientifica personale che la storia del pensiero umano ricordi » (1).

In questa sua opera di investigazione, in questa sua curiosità di sapere e di spiegare, la sua sola guida è la natura, che « è piena di infinite ragioni, che non furono mai in isperienza ».

Leonardo si rifiuta di « credere », vuole constatare; il suo spirito indagatore ed osservatore non ammette e non riconosce l'autorità dei testi, ma solo « le cose tratte dalla esperienza », perchè « la sperienza interprete in fra l'artifiziosa natura e la umana spezie, ne insegna ciò che essa natura in fra' mortali adopra da necessità constretta ». Egli è così, con-

tinuamente e naturalmente, portato a risalire alle origini in ogni sua indagine; la sua sete di sapere, di spiegare, di comprendere rimane insaziata, e la sua opera — così nell'arte, come nella scienza — è incessantemente sottoposta ad una tormentosa revisione. Dopo Aristotele — scrive il Müntz — nessun altro cervello umano aveva mai lavorato con tanto febbrile ardore a scoprire il perchè di tutte le cose.

E può sembrare strano che in un ambiente — come il fiorentino — più versato nelle arti che nelle scienze, attratto più dalla bellezza esteriore che dalla verità, abbia potuto sorgere e maturare uno spirito positivo e realizzatore come quello di Leonardo. Ma, al tempo del Vinci, Firenze era anche un centro d'intensa attività industriale e vi prosperava una rigogliosa industria tessile, così come nella vicina Bologna fioriva l'arte della filatura; ovunque nei principali centri italiani si costruivano imponenti edifici, e in Lombardia particolarmente sviluppate erano le costruzioni e le applicazioni idrauliche.

Niente di più naturale che Leonardo, osservatore acutissimo ed assimilatore geniale abbia potuto e saputo sviluppare — oltre alle altre sue attività — anche quella di meccanico e di costruttore di macchine.

Indubbiamente molte delle macchine e dei dispositivi meccanici disegnati nei Codici vinciani sono

stati da Leonardo tratti da costruzioni esistenti; altri egli potè conoscere attraverso opere note e certamente diffuse al suo tempo. Manoscritti di diversi autori nei quali si tratta di costruzioni di macchine sono giunti fino a noi, ed è anzi particolarmente abbondante ed interessante il complesso dei testi che risalgono al XV secolo, che ci fornisce un quadro, certo insufficiente, ma comunque indicativo, di quello che erano la tecnica e la meccanica applicata nel periodo che precede immediatamente Leonardo.

Questi manoscritti di autori più o meno noti ed individuati appartengono — come nota il Beck — a tecnici ed ingegneri, i quali nella media debbono considerarsi superiori, per scienza, alla media dei loro colleghi di mestiere. Tra quelli che noi conosciamo sono da ricordarsi in modo particolare gli italiani: Jacopo Mariano, detto il Tàccola (seconda metà del XV secolo); Francesco di Giorgio Martini (1439-1502); Giovanni Fontana (1395-1455); Roberto Valturio (1413-1483) ed i tedeschi: Konrad Kyeser, Haasenwein, Konrad Kauder, Hans Hartlieb; Augustinus Dachssberg; Hans Schulten; Hans Hentz; Konrad Gürtler, Martin Mercz; Philipp von Seldenek; Ulrich Bessnitzer; Philipp Mönch, oltre ai molti anonimi. Tra questi ultimi — in parte studiati dal Feldhaus — a parte il complesso degli anonimi del grande manoscritto di Weimar comprendente 329 tavole, delle quali il

nucleo fondamentale è costituito dal "Bellifortis" del Kyeser, iniziato a quanto pare nel 1430 e contenente diversi disegni meccanici, sono da citarsi: il Libro dei Mastri costruttori di Archibugi (Vienna 1435) esclusivamente dedicato alle armi da fuoco; l'altro manoscritto sulle armi da fuoco ascritto a tale Abraham, nel 1422 al servizio del Duca Federico IV d'Austria; l'anonimo della Guerra degli Ussiti (1420), che ha lasciato un Ms. con 48 tavole probabilmente derivate dal Kyeser, nelle quali sono disegnati: macchine di sollevamento; stantuffi, battipali, cinture per nuoto; ruote idrauliche, arnesi da palombaro, battelli a ruote; trapani, mole, mulini.

Che Leonardo abbia o non abbia conosciuto tutte queste opere è difficile stabilire, è comunque certo che di alcune ebbe conoscenza e ne riprodusse disegni e tavole e che, prima di lui, molti dispositivi e molte macchine erano ben note e venivano costruite fin dai tempi più antichi. In Aristotele, ad esempio, troviamo già non poche applicazioni meccaniche importanti come il mazzapicchio, la bilancia, la manovella, il cilindro, le taglie, la frombola, e naturalmente, le cosidette macchine semplici.

E' pure noto che ad Archimede molte macchine e meccanismi si attribuiscono, e fra le altre: la vite senza fine, la coppia vite senza fine-ruota cilindrica; la coclea; a Ctesibio si fanno risalire alcune applicazioni

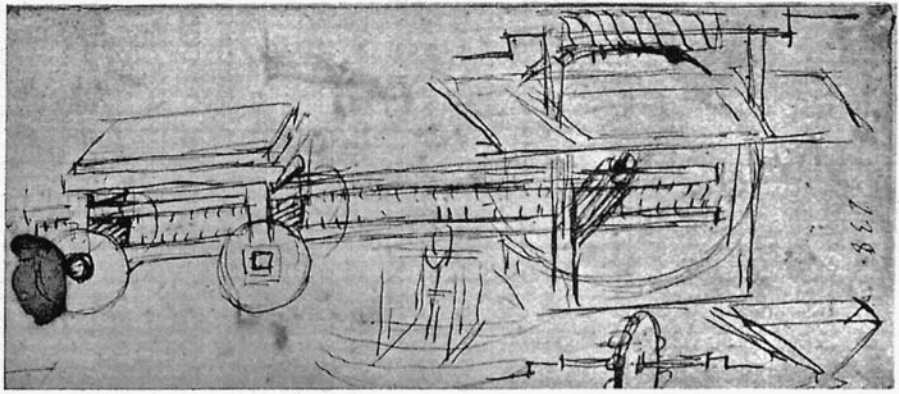


Fig. 1. - Carrello scorrevole a doppia dentiera, per pesanti trasporti, che Leonardo ha probabilmente tratto da una tavola di J. Mariano. (Gall. degli Uffizi, 204 v.)

dell'aria compressa; diversi tipi di pompe; gli organi ad aria; torchi per stampa; orologi ad acqua; valvole coniche e rubinetti di chiusura, tutte applicazioni che il suo allievo Erone ha perfezionato, sviluppando in modo particolare gli automati ed inventando e riprendendo: sifoni, valvole a cerniera; pompe da incendio, ruote a vento, ruote dentate, ruote con denti obliqui; macchine a leva; e diverse applicazioni di meccanismi a vapore tra i quali la famosa eolipila.

Leonardo scrive è vero: "le mie cose son più da essere tratte dalla sperienza che d'altrui parola", intendendo affermare la sua assoluta indipendenza da tutto ciò che s'era fatto prima di lui, ma egli è anche e sopratutto un pittore, un osservatore della natura e di ciò che lo circondava, ed è naturale che oltre ad avere assimilato la scienza degli antichi sulla quale ha lungamente meditato, abbia anche considerato, studiato, spesse volte fissato sulla carta, traendole dal vero, molte delle macchine e dei meccanismi esistenti e che lo interessavano in modo particolare. E noi lo immaginiamo, al pari di un ingegnere moderno, soffermarsi davanti ad una macchina o ad un impianto e, rapidamente, schizzare quel complesso o quei particolari che più lo attraevano, sul suo inseparabile libro di appunti e di disegni. Egli stesso scrive: "questa benigna natura ne provvede in modo che per tutto il mondo tu trovi dove impa-

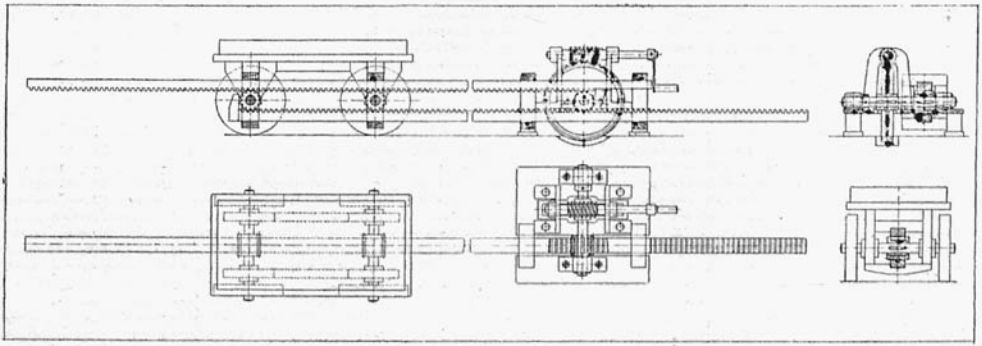


Fig 2 - Ricostruzione del carrello trasportatore disegnato da Mariano e da Leonardo

rare" e rivela la sua inesauribile sete di sapere e la sua attenta, vigile, continua opera di investigazione e di indagine.

Egli tutto osserva, tutto annota, poi "con l'intelletto ed il piccolo libro di note pieni di osservazioni, di disegni attinti al vero rientra nella sua piccola stanza fatta per lo studio" e, guidato dalla sua particolare predilezione per le matematiche e dal suo singolare genio scientifico, non solo vuol rendersi conto dei fenomeni rilevati, dei meccanismi schizzati, delle manifestazioni naturali osservate, ma vuol stabilirne i principi e le leggi.

La grande originalità del genio vinciano sta appunto in questo voler risalire dai fenomeni alle cause, in questo cercare di provocare appositamente questi fenomeni per trovarne e misurarne i rapporti, onde fissarne il principio in una formula matematica od in una legge perchè "nessuna certezza è dove non si può applicare una delle scienze matematiche", partendo dal presupposto fondamentale che "la proporzione non solamente nelli numeri e misure fia ritrovata, ma etiam nelli suoni, pesi, tempi, siti, e 'n qualunque potenzia sia".

Del pari nel campo delle macchine, se indubbiamente Leonardo s'è ispirato nei suoi disegni a molte di quelle esistenti, è altrettanto certo che egli non s'è accontentato di copiare, ma ha voluto prima di tutto

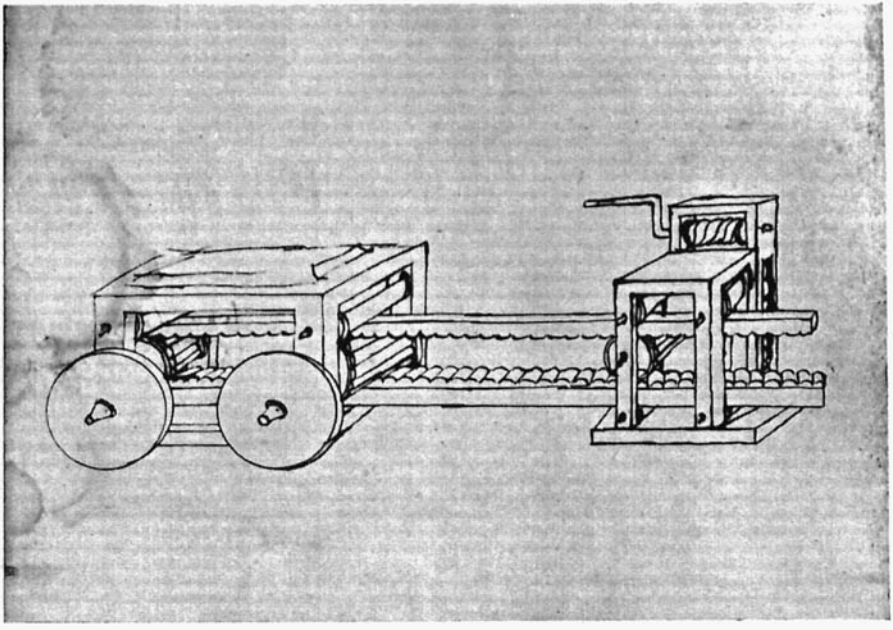


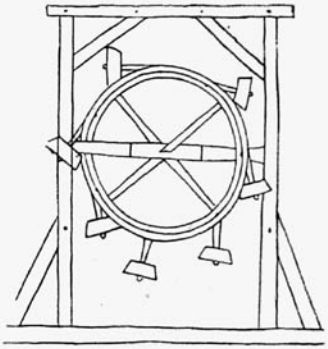
Fig. 3. - Carrello trasportatore a dentiera disegnato da Jacopo Mariano.
(Ms. della Bibl. Marciana, 1449)

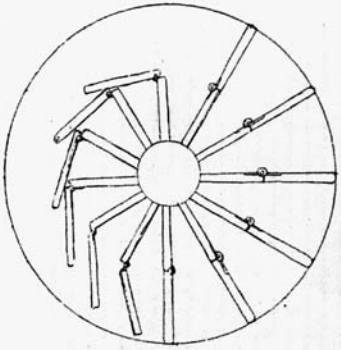
analizzare i complessi meccanici — comprenderne il funzionamento, precisarne i movimenti, studiarne i particolari.

Con lui si può dire abbia origine il disegno di macchine e la trattazione grafica degli elementi cinematici.

Non s'hanno che da confrontare i disegni dei meccanici ed ingegneri che lo precedono o che gli sono contemporanei, con quelli dei suoi codici per rilevare la fondamentale diversità di concezione tra le macchine di Leonardo e quelle dei predecessori.

Manovellismi, trasmissioni a catena, ruote dentate, ruote a vento, forbici di Norimberga, ruote mosse per azione del vapore, rulli, argani, trapani, mulini azionati da forza muscolare o dalla forza del vento, torni, presse, filiere, battelli a ruote, strumenti da palombaro, cavafanghi, macchine tessili, veicoli per pesanti trasporti, armi da fuoco, pompe ed impianti idraulici diversi, trasportatori esistevano e venivano normalmente impiegati anche prima di Leonardo, ma mentre prima di lui la macchina non era che un complesso ideato e costruito — dopo ripetuti tentativi — per vincere delle resistenze, che veniva considerato come un tutto unico, con lui diviene un insieme di meccanismi e di organi distinti, studiati per realizzare movimenti di natura determinata. Con lui si chiarisce il concetto di forza applicata alla macchina.





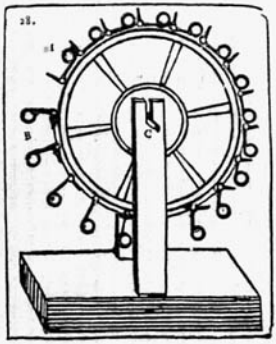


Fig. 4 - « Perpetua mobilia » disegnati da: Wilars (1245), da Mariano (1438) e da Capra (1727)

Leonardo comprende chiaramente quale è la funzione della macchina, non già creatrice, ma semplice trasformatrice di energia, ed è il primo che nei suoi meccanismi e nei veicoli considera l'attrito, introducendo quindi il concetto di rendimento, che è fondamentale nella meccanica moderna. Con altrettanta chiarezza considera la macchina dal punto di vista del lavoro che può eseguire nella unità di tempo e non può meravigliare che si scagli contro "li speculatori dello continuo moto", che per molto tempo ancora — dopo di lui — troveranno credito anche nei consessi degli scienziati. Tanto che negli "Acta Eruditorum" di Lipsia del 1715 — duecento anni dopo il Vinci — si ritrova ancora un rapporto ufficiale di una commissione di dotti che sanziona con parere favorevole un **perpetuum mobile** di Orfeyrey.

Leonardo riprendendo lo studio di un « perpetuum mobile » probabilmente da un disegno del Mariano, che si ritrova però frequentemente in altri autori anteriori, fra i quali il Wilars (1245), scrive al foglio 90 V. del secondo dei Codicetti Forster: « questa a uno che in tali strumenti sia ignorante, gli parrà che abbi del verosimile, imperocchè esso dirà: se io le dò prima un poco di moto e chi vi s'agiunga il colpo, cierto esso colpo facilmente manterrà il principiato moto e non sa che non farà ».

Nel 1727 anche l'architetto cremonese Alessandro



Fig. 5. - Discussione sul moto perpetuo di una ruota a pesi.
(Cod. Forster, II, 90 v.)

Capra nel suo volume « La Nuova Architettura Civile e Militare », considerando sempre questo dispositivo di moto perpetuo scrive: « la presente ruota dev'essere perpetua nel fare il suo moto ».

E' in questa analisi della macchina, in questa esatta comprensione della sua funzione che Leonardo va considerato il precursore sommo. Contrariamente a quanto afferma il Reuleaux — secondo il quale sarebbe stato per primo il Leupold nel 1724 a distinguere fra singoli meccanismi e macchine ed a studiarli separatamente — è in Leonardo che troviamo non solo i primi frequenti accenni agli "elementi machinali", ai quali spesso rinvia nel corso delle sue descrizioni di macchine, ma anche lo studio particolareggiato di coppie cinematiche e di organi meccanici. Anche se Leonardo non ha compilato quel trattato sulle macchine, che pare si fosse proposto di pubblicare, oltre a quelli: sull'urto dei corpi, sul moto, sull'attrito, sul volo degli uccelli e sulla anatomia, sono più che sufficienti i disegni dei suoi codici per fargli riconoscere questa priorità e per proclamarlo — con le parole stesse degli scrittori del XVI secolo — "il primo meccanico del suo tempo".

E' nostro parere anzi che la grandezza e la originalità di Leonardo meccanico, non è tanto nella ideazione od invenzione di macchine, quanto nello studio degli elementi che compongono queste mac-

chine. E se è impresa ardua, e comunque incerta, stabilire quali siano le macchine originali da lui concepite, perchè come vedemmo scarsa ed incompleta è la documentazione che si possiede, può per contro affermarsi che non esistono prima di lui esempi di costruttori che trattano e disegnano la macchina con così chiara evidenza, scomposta nei suoi organi elementari, studiata nei suoi particolari, considerata nella sua effettiva funzione, calcolata in rapporto alle resistenze di vario genere — comprese quelle di attrito — che al suo lavoro si oppongono.

Purtroppo non tutti i disegni di macchine e di meccanismi che ci ha lasciato Leonardo nei suoi manoscritti sono comprensibili; ma molti ce ne ha lasciati chiarissimi, e così perfetti, che non si sa se ammirare più l'opera dell'artista o quella dell'ingegnere.

Normalmente egli rappresenta macchine od elementi meccanici prospetticamente; si tratti della riproduzione di una macchina già esistente o dell'abbozzo di una sua concezione originale, Leonardo disegna la macchina come la vede nel suo complesso, ed è l'artista, talvolta, che prevale sul meccanico.

Raramente la rappresenta completa, più frequentemente invece si sofferma sul particolare che lo interessa, sull'elemento meccanico che perfeziona, sulla parte costruttiva originale o di difficile rea-

lizzazione. E questo suo procedere induce appunto a pensare che in gran parte la sua opera di costruttore sia stata impiegata più che alla concezione di nuove macchine, al perfezionamento di quelle esistenti. Ed è appunto da questo suo paziente ed appassionato lavoro di comprensione delle macchine e dei meccanismi esistenti che egli trae un ausilio potente per arrivare, naturalmente, alla concezione di nuovi trovati e di nuove applicazioni. Le sue invenzioni non sono dunque un prodotto casuale e fortuito, ma la conseguenza di un processo scientifico sistematicamente seguito.

E' lui stesso del resto che conferma questo procedimento quando scrive: "le mie cose son più da essere tratte dalla sperienzia che d'altrui parola", od ancora "a ciascun strumento si richiede esser fatto colla sperienzia".

L'insistenza con la quale ripete a volte disegni o schizzi di uno stesso meccanismo od elemento meccanico dimostra d'altra parte come Leonardo, alle sue applicazioni o realizzazioni meccaniche, arrivi attraverso una fase, spesso lunga e travagliata di ricerche e di esperimenti.

Frequentemente, tracciata la macchina nel suo complesso, disegna sullo stesso foglio, quasi sempre prospetticamente, spesso in sezione, alcuni particolari; altre volte riprende su altri fogli il suo progetto

o studio, di rado descrive o commenta, sovente aggiunge solamente qualche richiamo o fa qualche riferimento. Ed è prodigioso il tumulto creatore di questo genio, che non ebbe limiti alla sua sete di sapere e di creare.

Leonardo non quota i suoi disegni meccanici e raramente ne indica le dimensioni, affidandosi al suo meraviglioso senso delle proporzioni; non sono rari nelle sue tavole gli esempi di organi disegnati con vista in piano o in sezione retta. Quando di essi ne faccia una descrizione e ne spieghi il funzionamento Leonardo usa, per i richiami, la indicazione con lettere dell'alfabeto; spesso a fianco della macchina o dell'istrumento ne scrive il nome o la funzione: « tornio », « spingarda », « coda di bombarda che non torna indietro », « smeriglio », oppure « modo che le lime s'intagliano per loro medesime », « succhiello da forare la terra per trovare l'acqua », « modo d'incatenare travi d'un palco »; similmente in altri casi richiama l'attenzione su questo o quell'elemento di macchina: « bilico », « perno indirieto », « ruota circundata dalla elica composta ».

Queste osservazioni valgono naturalmente per i manoscritti vinciani che conosciamo e che non sono che i fogli di appunti, di abbozzi e di note personali, non destinati nè alla pubblicazione, nè agli operai

od agli artigiani che lavoravano nella officina di Leonardo.

Egli stesso però nel frammento di lettera a Giuliano De' Medici, scritto sul foglio 243 v. del Codice Atlantico, riferendosi ad un meccanico tedesco, della cui opera si serviva, scrive: « Di poi la richiesta di costui fu di avere li modelli finiti di legname, com'ellino aveano a essere di ferro, e' quali volea portare nel suo paese. La qual cosa io li negai dicendogli, ch'io li darei in disegno la larghezza, lunghezza e grossezza e figura di ciò ch'elli avesse a fare; e così restammo malvolentieri ».

Ed il passo è della massima importanza perchè prova che Leonardo traduceva i disegni o schizzi o progetti di massima tracciati sui suoi fogli o libretti di appunti, in disegni costruttivi, da passare agli artigiani del laboratoro, debitamente quotati e completi in ogni loro parte. L'accenno « ai modelli finiti di legname com'ellino aveano a essere in ferro » prova anche — evidentemente — che in taluni casi egli procedeva alla costruzione di questi modelli, per rendere più comprensibili i suoi meccanismi e più facile la costruzione delle sue concezioni meccaniche e conferma — se ve ne fosse bisogno — che certamente egli costruì gran parte delle macchine progettate.

Dei materiali impiegati nelle sue costruzioni è probabile che, nei suoi fogli di appunti, egli faccia

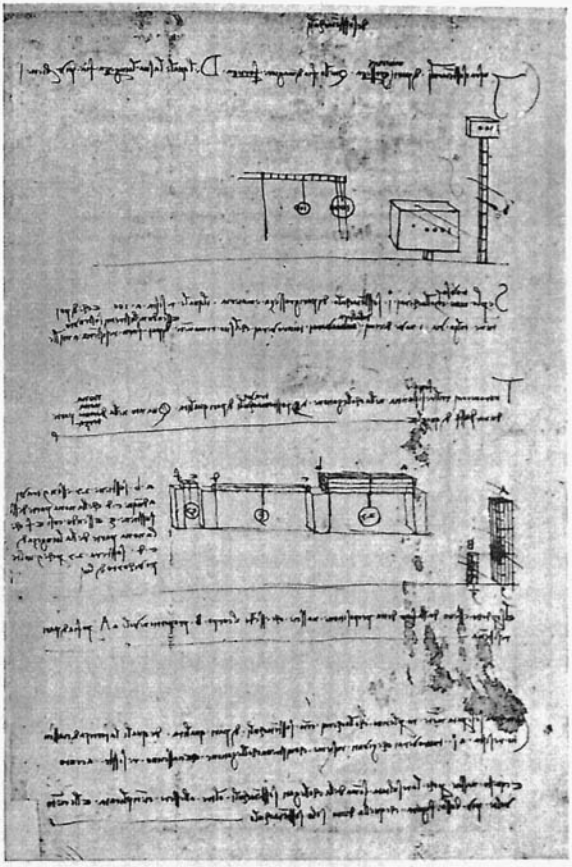


Fig. 6. - Studio sulla resistenza delle travi. (Cod. Atl., 152 Rb.)

menzione solamente quando si tratti di macchine o meccanismi di nuova costruzione, mentre per le macchine note raramente dà indicazioni in proposito. Spesso infatti ricorrono le indicazioni relative ai materiali da impiegarsi accanto ai disegni per gli strumenti del volo. Sotto il suo famoso elicottero o vite aerea del foglio 83 v. del Codice B scrive appunto « sia l'armatura della sopradetta tela di canne lunghe e grosse. Puossene fare un picciolo modello di carta, che lo stile (asse) suo sia di sottile piastra di ferro e torta per forza »; così sotto lo schema dell'ala del Cod. B, foglio 74 r. consiglia: « **A** sarà di abete innerbata, che ha tiglio ed è leggere. **B** sarà fustagno... **C** fia taffetà inamidato »; in altri casi per altre macchine consiglia l'impiego del ferro, del rame, dello stagno: « fal di rame avvinato. Sol per isperienza, e saldali uno orlo, o tu lo ferma 'n un cerchio a uso di fondi di scatola » (Cod. Atl. 354 Va), oppure « ... gitta in esso legno una vite di stagno, e sopra quella fa la forma, e gitta d'ottone o bronzo » (Cod. Atl. 367 Va.). E sono evidentemente richiami che serviranno a lui nella stesura del progetto definitivo.

Che Leonardo annettesse molta importanza allo studio ed alla scelta dei materiali da costruzione delle sue macchine si può constatare non solamente dalle sue esperienze sulla resistenza delle travi prismatiche e cilindriche sollecitate a pressione ed a flessio-

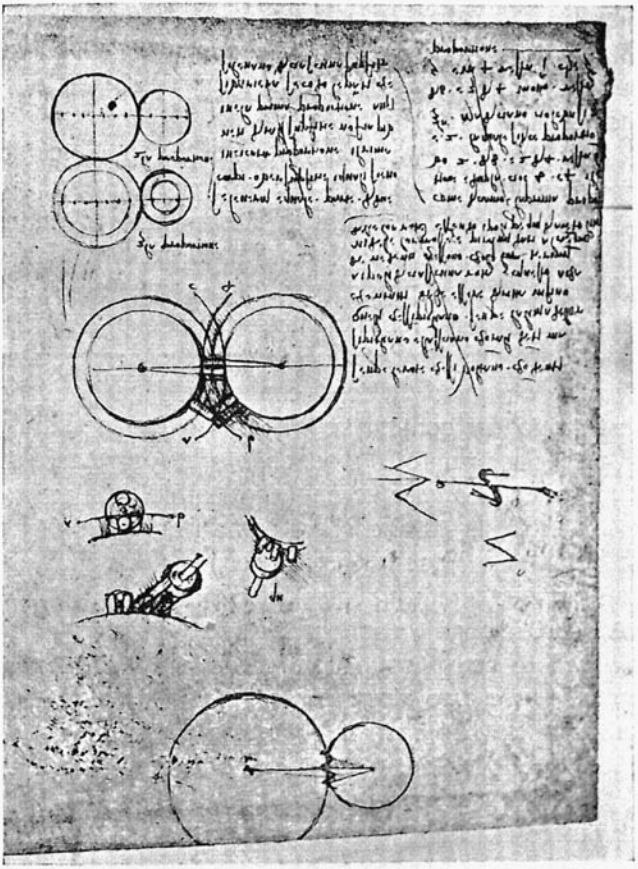


Fig. 7. - Ricerche sui profili di contatto delle ruote dentate. (Cod. Atl., 61 Va.)

ne, esperienze nelle quali precede di un secolo e mezzo Galileo, giungendo a conclusioni in parte corrette, ma anche in altri studi sperimentali più direttamente interessanti le sue macchine.

Sotto il disegno di un rotismo a denti elicoidali troviamo — per esempio — scritto: « questo per isperienza è provato, che chi non si fida mai sarà ingannato » (Cod. Atl. 334 Rb). Così al foglio 61 Va dello stesso Codice si preoccupa dello studio dei profili di contatto delle ruote dentate cilindriche, probabilmente allo scopo di evitare l'eccessivo consumo dei denti e osserva: « i denti che s'impigliano, sempre la linia de' lor contatti debbe essere diritta infino ai poli di ciascuna rota »; ed ancora sul consumo dei denti in una coppia: corona dentata-ruota a lanterna al Ms. H foglio 86 v. osserva come i denti del pignone a lanterna (rocca) K « si consumano il dopio perchè ha due moti: traverso e oblico » (Fig. 8). In altri casi espone « sperienze con fili di ferro e magliette », o scrive sotto un meccanismo « sperimenta questo », ma uno degli esempi più interessanti del suo metodo sperimentale è quello riportato sul foglio 82 Rb. del Cod. Atl. che ha per titolo « sperienza della forza che può fare un filo di ferro in varie lunghezze ».

Leonardo dopo avere descritto l'apparecchio che si vede in figura e che è costituito da una tramoggia

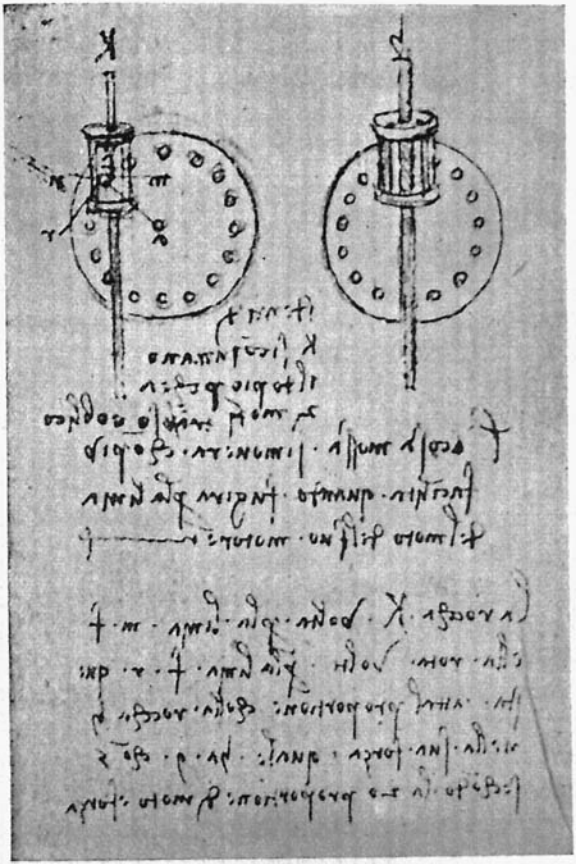


Fig. 8 - Studio sul consumo dei denti in una coppia di trasmissione.
(Ms. H, 86 v.)

contenente sabbia, la quale può venire versata per una piccola apertura inferiore dentro una secchia o « cavagno » appesa al filo, di cui vuol sperimentarsi la resistenza alla trazione, scrive: « appicca un filo di ferro di lunghezza di 2 braccia, o circa, in loco che stia forte; di poi li appicca uno cavagno, o sporta, o quello che a te pare, nel quale, per uno picciolo buso, verserai una tramoggia di minuta rena; e quando esso filo non potrà più sostenere, si rompa; adatta una molletta che subito el buso della tramoggia si riserri, acciò che più rena non caggi in esso cavagno »; e poi continua: « e nota quanto peso fu quello che esso filo spezzò, e nota in che parte di sè detto filo si rompe, e fa più volte questa pruova, per confermare se sempre in un medesimo loco si rompe. Di poi fa esso filo più corto la metà di prima, e nota quanto peso sostiene di più; e poi lo fa 1/4 della prima lunghezza, e così di mano in mano farai in diverse lunghezze, notando il peso che ciascuno rompe e il loco dove si rompe. E questa prova farai di ciascun metallo e legnami, pietre, corde ed ogni cosa che sia atta a sostenere; e fa di ciascuna regola generale... » (Fig. 9).

Ed è sufficiente per rivelare la razionalità del procedimento vinciano che porterà alla « regola generale » ossia alla teoria, e la chiara visione che Leonardo aveva del metodo sperimentale.



Fig. 9. - Apparecchio per sperimentare la resistenza dei fili.
(Cod. Atl., 82 Rb.)

Poichè nel passo sopracitato si trova un accenno al « braccio », unità di misura che Leonardo adopera per le lunghezze, oltre al miglio, rileveremo che probabilmente egli si riferiva al braccio fiorentino che è stato calcolato eguale a m. 0,5512. Non è improbabile che in altri casi egli si riferisca al braccio

milanese eguale a m. 0,5949, ma, da quanto espone il Baratta (2), deve ritenersi che normalmente negli scritti vinciani le lunghezze vanno calcolate in base al braccio fiorentino, ed al miglio toscano pari a 3000 braccia (metri 1653,607). Lo stesso dicasi per la misura dei pesi e per la libbra che si calcola pari a gr. 339,5 a Firenze mentre a Milano era di gr. 326,79.

Vedremo, a proposito di alcune interpretazioni dei disegni meccanici di Leonardo, come in alcuni casi egli abbia adottato una trasposizione di piani per raggiungere una maggiore evidenza nella rappresentazione del meccanismo o del complesso; non sempre peraltro questa evidenza è raggiunta e non son poche le macchine o gli organi meccanici abbozzati nei Codici che rimangono tutt'ora incomprensibili e non completamente svelati.

E' probabile che Leonardo molte sue idee abbia semplicemente tracciato e poi abbandonato; è pure altrettanto probabile — come accade a qualsiasi costruttore — che alcuni progetti, anche se apparentemente sviluppati, egli stesso abbia giudicato ineseguibili o addirittura errati. Certo è che alcune delle macchine o dei complessi meccanici da lui disegnati o non sono realizzabili o, se realizzati, non hanno certamente funzionato. Tutto questo non menoma affatto la eccelsa figura di Leonardo costruttore, ma prova solamente che egli, come tutti gli ingegneri ed i mec-

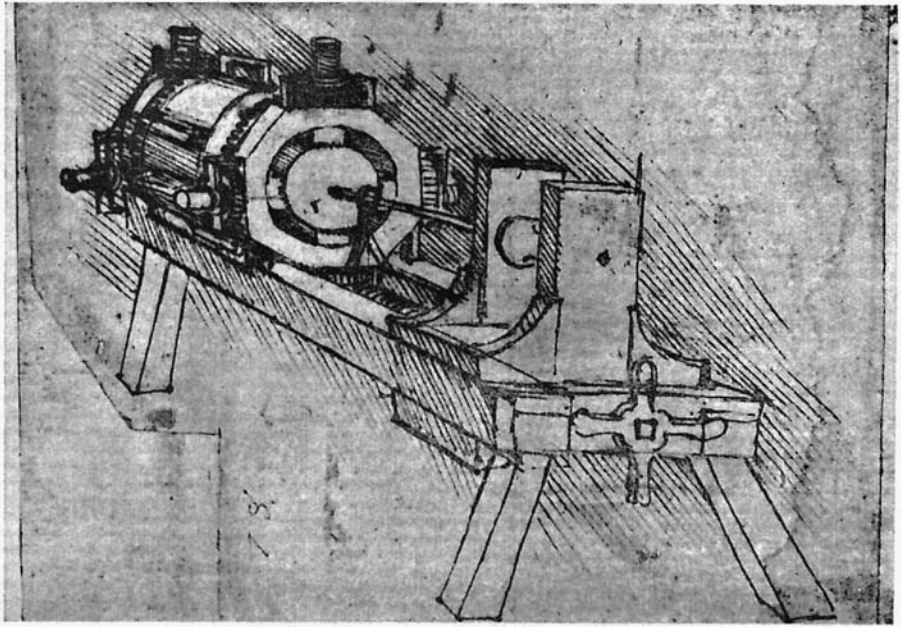


Fig. 10. - Foratrice con dispositivo autocentrante. (Cod. Atl., 393 Rb.)

canici, ha qualche volta dovuto piegarsi davanti alle esigenze costruttive. Tanto più ardue e numerose in quanto egli doveva impiegare una mano d'opera necessariamente poco esperta in certe lavorazioni, e non disponeva che di limitate fonti di energia, quali: quella idraulica; quella muscolare dell'uomo o degli animali; quella delle molle; quella potenziale dei pesi e quella del vento, tutte già sfruttate fin dai tempi più antichi.

Nel girarrosto a ventola Leonardo ci lascia anche un esempio di impiego della corrente d'aria calda, come forza motrice, che è probabile sia il primo del genere. Egli ha anche studiato — come appare dal foglio 10 r. del Codice Leicester — la forza di espansione del vapore, già nota del resto ad Erone, ma non ne intravede applicazioni pratiche. Precede comunque in questi esperimenti Giambattista Porta e Salomon de Caus. La difficoltà della interpretazione di molti dei disegni di macchine vinciane, se ha da una parte impedito che si conoscesse appieno l'opera veramente imponente e complessa di questo genio universale, ha d'altra parte concorso sia a fare attribuire a Leonardo invenzioni ed applicazioni non sue, sia a fargli inventare anche quello che in realtà egli non deve avere mai neppure concepito.

Abbiamo troppo scarse notizie sulle conoscenze meccaniche del tempo per potere distribuire brevet-

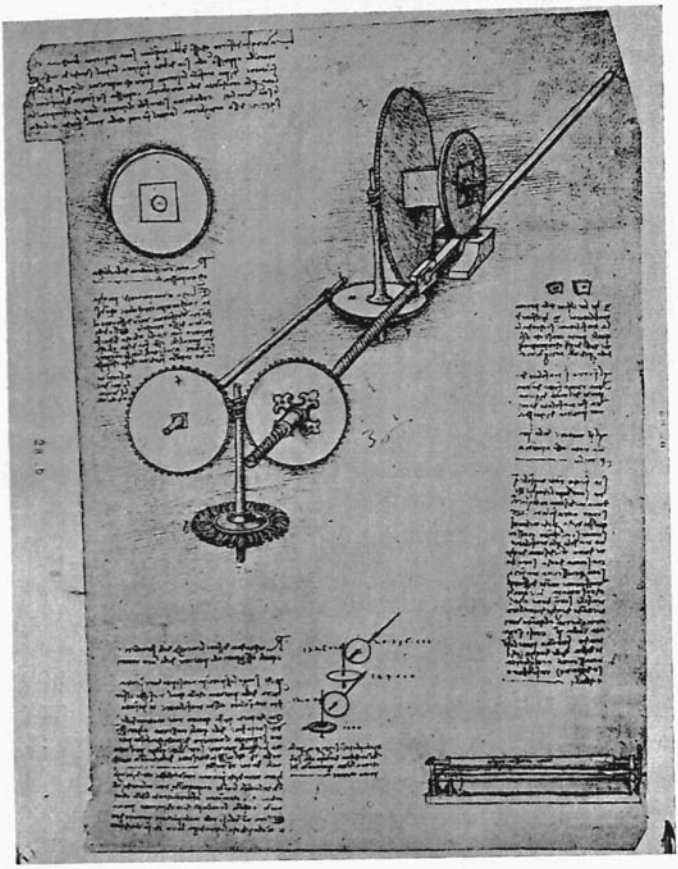


Fig. 11. - Banco per trafilare barre metalliche. (Cod. Atl., 2 Ra.)

ti di priorità, e d'altra parte non è questa o quella supposta invenzione che potrebbe aggiungere nuova luce al genio splendente di questo grande italiano. Uno dei più nitidi disegni leonardeschi — ad esempio — quello riferentesi alla foratrice con dispositivo autocentrante, unanimamente attribuita a Leonardo, non pare sia del tutto di sua invenzione. Infatti Felice Falri nella sua **Historia Suevorum** scritta verso la fine del XV secolo, descrive una macchina per forare tubi, azionata da una ruota idraulica e funzionante ad Ulma, che corrisponde esattamente alla foratrice del foglio 393 R. del Cod. Atlantico. Ne ebbe notizia Leonardo? E' probabile, tanto più che il suo disegno è di getto e completo in ogni sua parte; cosicchè s'è portati a pensare che questa macchina egli abbia riprodotto e non progettato, o comunque abbia lievemente modificato e perfezionato. (Fig. 10).

Comunque quello che importa, nel considerare l'opera di Leonardo costruttore di macchine, non è già di stabilire quali siano precisamente le applicazioni o le macchine originali da lui progettate, ma di mettere in evidenza la razionalità dei suoi procedimenti; la visione chiara e conseguente che egli aveva del complesso meccanico; lo sviluppo preciso delle sue idee nella realizzazione di movimenti di natura determinata. Molto felicemente scrive il Gröthe: « quando egli s'è proposto un problema, concepisce in pri-

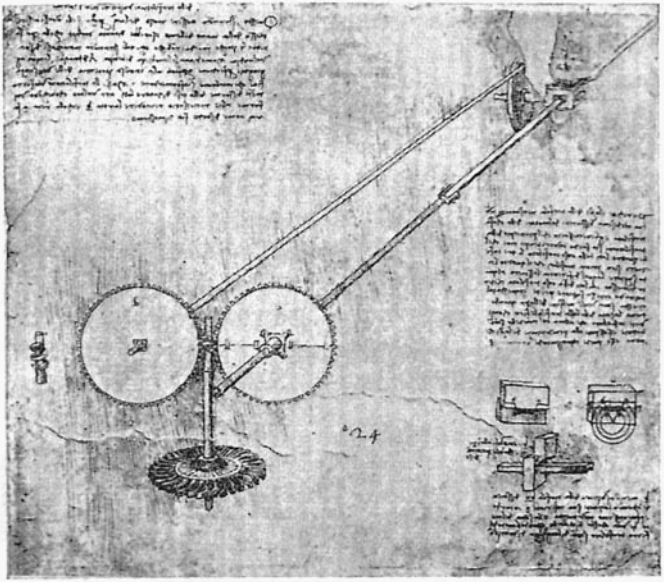


Fig. 12. - Particolari del banco per trafilare doghe. (Cod. Atl., 2 Rb.)

mo luogo l'idea generale della sua soluzione, e sovente, con rapidi tratti la fissa sulla carta. Fatto questo, egli passa ai dettagli e studia i diversi elementi del meccanismo che ha ideato nell'insieme. Attorno al primo abbozzo si raggruppano i ruotismi dei quali varia la disposizione e che egli accompagna con note e calcoli. Terminata la costruzione nei suoi elementi, egli prende un foglio bianco e fissa il disegno della macchina in linee precise».

Un bell'esempio di questo procedimento ci è offerto nei primi fogli del Codice Atlantico, e precisamente al foglio 2, sul quale Leonardo disegna con evidente chiarezza i principali elementi costituenti il banco per trafilare barre metalliche, la catena dei ruotismi, a fianco dei quali è il calcolo relativo, il cilindro o rullo sagomato o « ruota circundata dalla elica composta », le sagome della trafila, il dettaglio della vite senza fine. Il disegno d'insieme è poi accompagnato da una ampia descrizione, nella quale si danno consigli sulla costruzione e sulla lavorazione delle barre e si raccomanda « di fare le membra delli strumenti equali o superiori alle potenzie delli motori. Perchè senza la sperienza non si può dare scienzia vera della potenzia colla qual resiste il ferro trafilato al suo trafilatore ». Successivamente egli rimanda per il calcolo « alla 13ª del ventiduesimo delli elementi machinali da me composti », ossia al trattato che egli avrebbe composto e che non è giunto fino a noi, e nel quale egli evidentemente sviluppava la trattazione di questi elementi di macchine, dei quali noi troviamo frequentissime traccie nei manoscritti che ci sono pervenuti. (Figg. 11-12).

I limiti che ci siamo imposti in questo nostro studio particolarmente dedicato ai veicoli vinciani ed ai problemi che si connettono alla locomozione terrestre, non ci consentono di addentrarci nell'arduo, ma

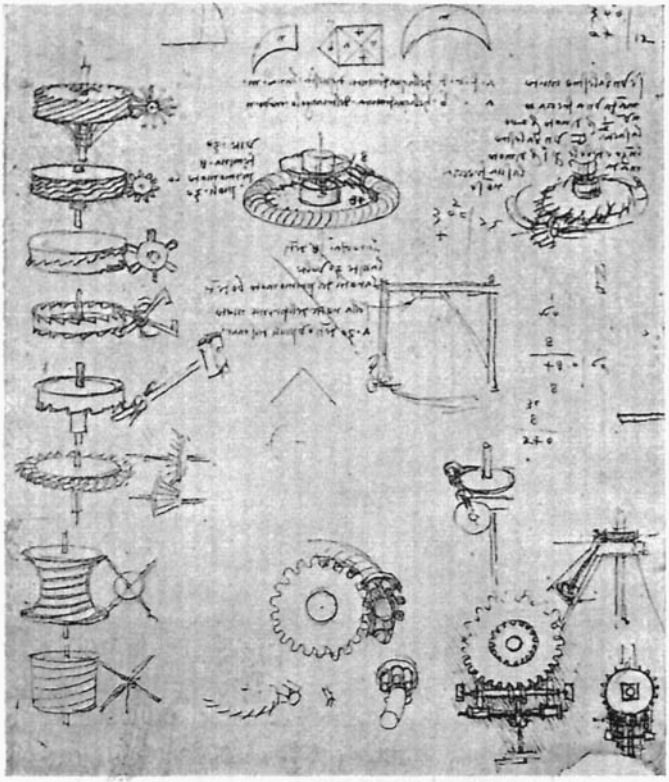


Fig. 13. - Particolari di ruotismi e di arpionismi. (Cod. Atl., 372 Rb.)

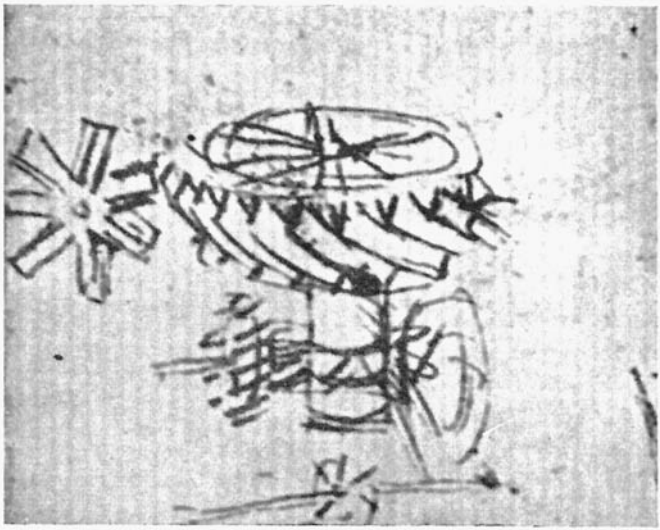


Fig. 14. - Ruotismo a denti elicoidali. (Cod. Atl., 344 Rb.)

attraentissimo esame di quella parte che può considerarsi costituisca la meccanica applicata di Leonardo, riteniamo però utile — anche perchè attinente all'argomento che trattiamo — illustrare qualcuno dei più interessanti esempi di questi « elementi machinali » tratti dai Codici vinciani.

La leva è la macchina semplice fondamentale, il meraviglioso « elemento machinale » che moltiplica la

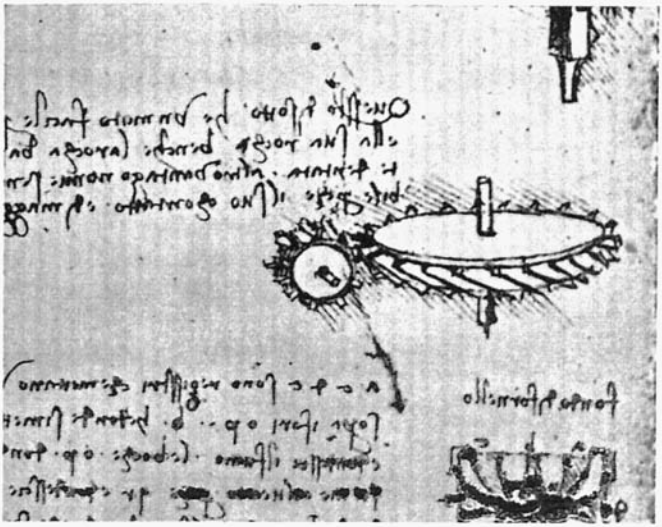


Fig. 15. - Ruota a dentatura elicoidale. (Cod. Atl., 396 Rc.)

forza, sul quale Leonardo basa i suoi calcoli; ed alla leva riduce infatti anche le ruote « che nelli strumenti stabilite sono, che da forza o peso voltate fieno » e che tutte « sono di natura di bilancia » e fanno « ofizio di perfecta bilancia, della quale il centro del polo fia centro del loro circulo ».

La ruota dentata è, naturalmente, uno degli organi di moto che più frequentemente ricorre nelle mac-

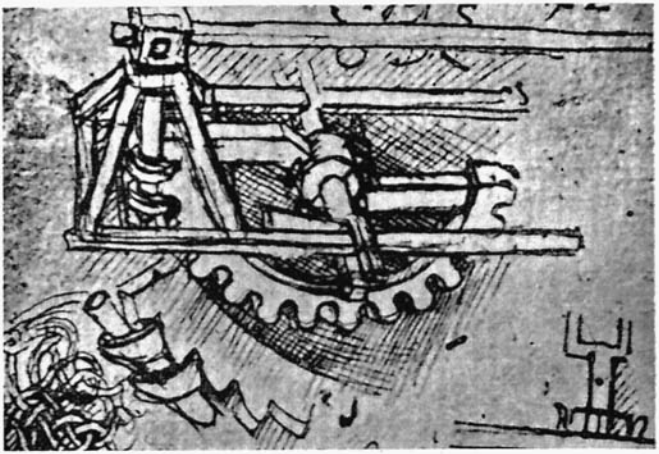


Fig. 16. - Denti tronco conici e coppia vite-ruota dentata. (Ms. B, 73 r.)

chine vinciane, e Leonardo ne fa una ampia trattazione grafica, disegnando i più svariati ruotismi e studiandone i problemi costruttivi specialmente riferentisi ai profili delle dentature da adottarsi, anche in riferimento alle potenze trasmesse.

In generale, e probabilmente per ragioni pratiche, la dentatura che più comunemente impiega nei suoi ruotismi è quella a fusi od a lanterna, sia che si tratti di ruote con assi paralleli, sia che si tratti di ruote ad assi perpendicolari. La coppia ruota a

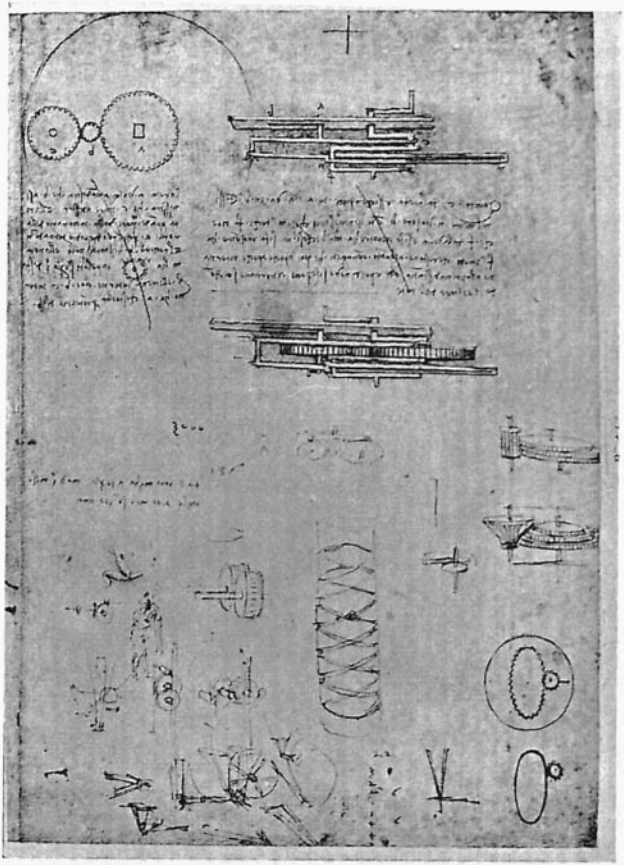


Fig. 17. - Studi su un ruotismo epicicloidale, su un complesso a manovella e glifo e su due cambi di velocità. (Cod. Atl., 27 Va.)

lanterna-ruota con corona di piuoli si trova frequentemente sia nelle macchine che nei veicoli da lui disegnati, ma evidentemente Leonardo aveva, attraverso la esperienza, potuto rilevare che — specie nella trasmissione di potenze notevoli — molti erano gli inconvenienti di queste ruote, che del resto tutt'ora si impiegano, per esempio, nei pozzi pugliesi.

Così egli disegna ingranaggi con denti a profilo triangolare, trapezio, a fianchi rettilinei, con dentatura elicoidale, con dentatura interna, coppie coniche, ruote ellittiche; spesso impiega la coppia vite senza fine-ruota a fusi e la coppia ruota-dentiera. In alcuni fogli dei Ms. dell'Institut de France ci lascia pure una serie di ruote con profilo speciale che rivelano il suo estro meccanico.

La vite ad uno o più filetti e con filetto a profilo rettangolare o triangolare, è trattata in modo esteso nei Codicetti Forster, dove fra l'altro scrive: « intra lle viti d'equal grossezza, quella sarà più dificile al suo motore, la quale arà in sè più strade ».

Tra le applicazioni più interessanti dei ruotismi, Leonardo ci lascia un abbozzo di due cambi di velocità uno dei quali — a tre diversi rapporti di trasmissione — con ruota motrice cilindrica e ruote condotte pure cilindriche e con assi paralleli; l'altro con ruota motrice conica e ruote cilindriche, montate sullo stesso asse. (Figg. 18 e 19).

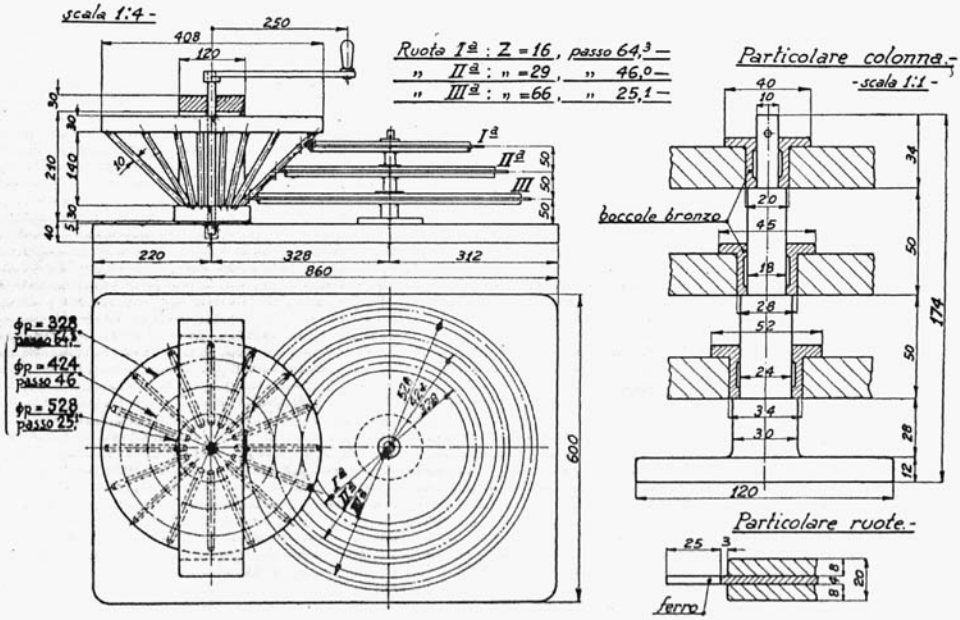
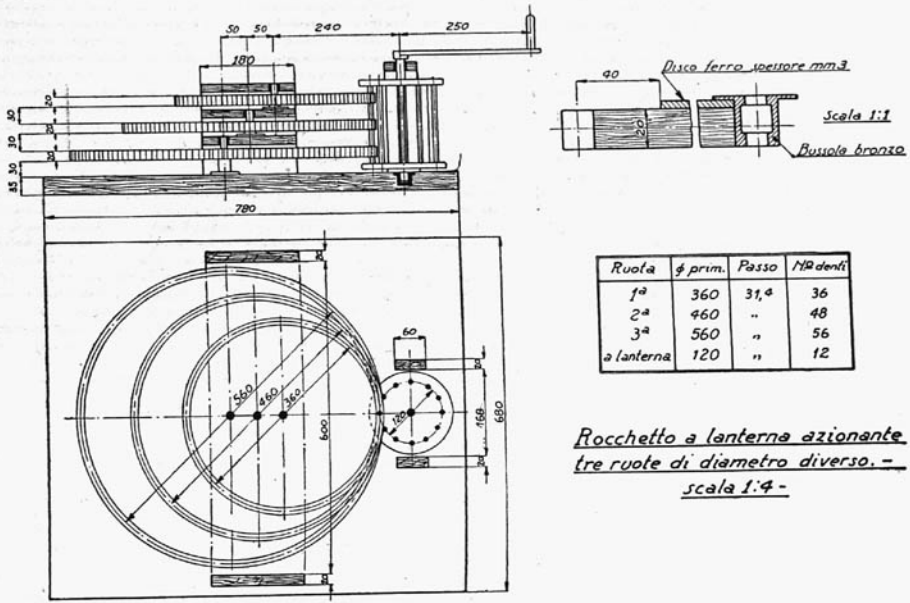


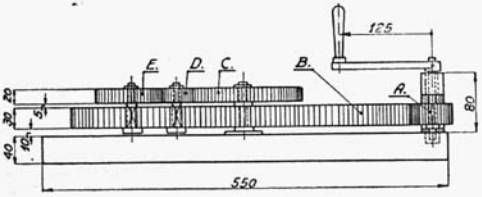
Fig. 18. - Disegno costruttivo del cambio di velocità con pignone conico tratto dal foglio 27 Va. del Cod. Atl.



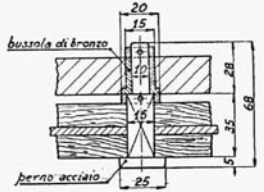
Ruota	ϕ prim.	Passo	N° denti
1ª	360	31,4	36
2ª	460	"	48
3ª	560	"	56
a lanterna	120	"	12

Rocchetto a lanterna azionante tre ruote di diametro diverso. - scala 1:4 -

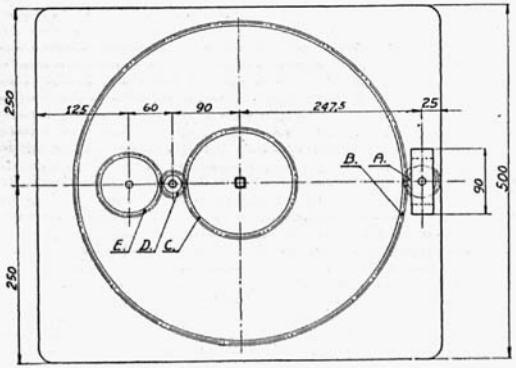
Fig. 19. - Ricostruzione del cambio di velocità a ruote cilindriche.
(Dal disegno 27 Va. del Cod. Atl.)

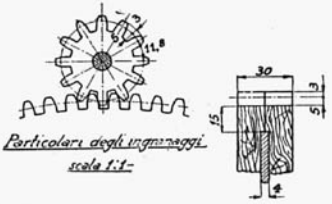


scala 2:5 -



Particolare ruota A.
scala 1:1-





Particolari degli ingranaggi
scala 1:1-

Pignone A.	z = 12 - ϕp. = 45		
Ruota B.	z = 120 - ϕp. = 450		
" C.	z = 40 - ϕp. = 150	} passo - 11,8 mm -	
" D.	z = 8 - ϕp. = 30		
" E.	z = 24 - ϕp. = 90		

Fig. 20. - Disegno costruttivo del ruotismo epicicloidale tratto dal foglio 27 Va. del Cod. Atl.

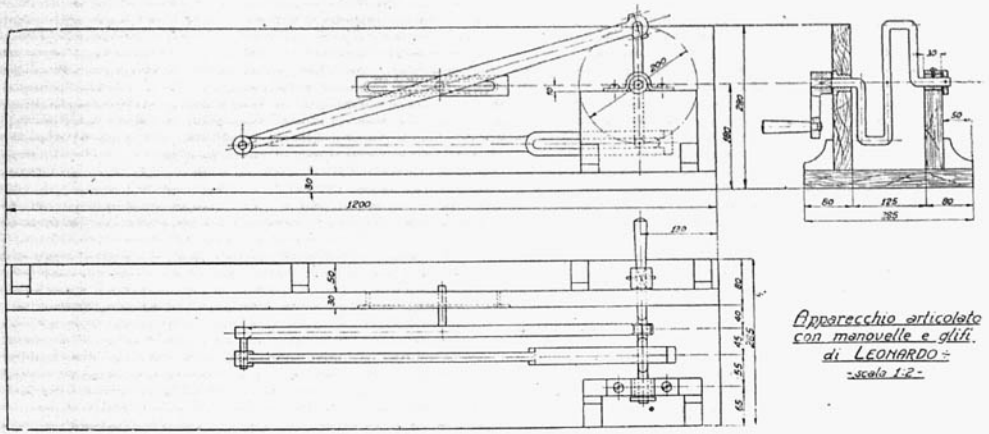


Fig. 21. - Interpretazione del complesso a manovelle e glifo del foglio 27 Va. del Cod. Atl.

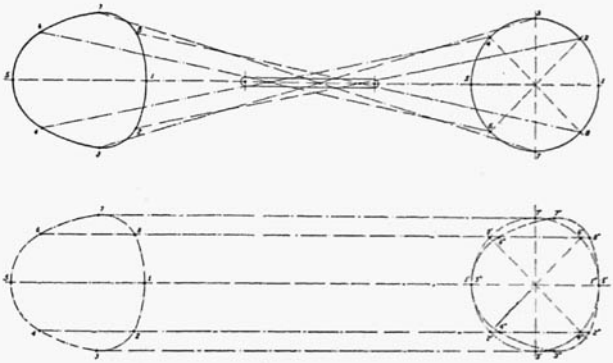


Fig. 22. - Studio cinematico del meccanismo della fig. 21

Sullo stesso foglio 27 V.a del Cod. Atlantico trovansi pure due attraentissimi complessi meccanici. Il primo è un ruotismo epicicloidale a due satelliti; l'altro è invece un manovellismo a glifi che parrebbe studiato per la trasformazione di un moto rettilineo alternativo in un moto ad eccentrico, secondo la curva tracciata nella nostra figura 22.

Tra gli altri « elementi machinali » ai quali ricorre spesso Leonardo è l'arpionismo, indispensabile sia nelle macchine che traggono la loro energia motrice da pesi a caduta, sia nelle macchine di sollevamento. Di sistemi a cricco, con ruote a dentatura esterna od interna, di congegni a scatto, di scappamenti, si trovano molti disegni e schizzi nei suoi codici e fra i più

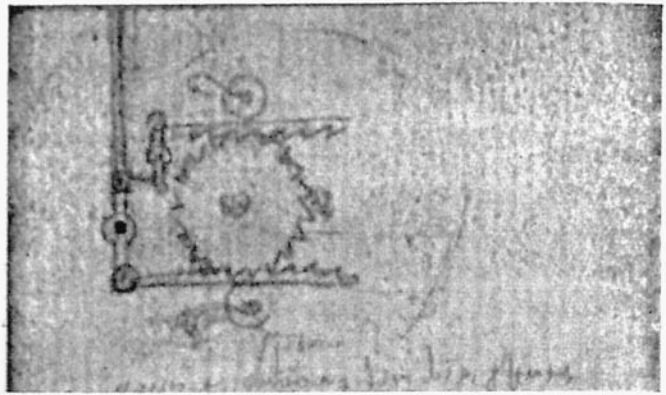


Fig. 23. - Arpionismo a doppio effetto. (Ms. H, 113 v)

originali citiamo quello del Ms. H-fol. 113 v. che è un arpionismo a doppio effetto per la trasformazione di un moto alternativo in un moto rotatorio.

La precisione con la quale Leonardo disegna i particolari di questi suoi « elementi macchinali » costituisce senza dubbio la caratteristica più originale di tutta la sua opera di costruttore di macchine e prova, se ve ne fosse bisogno, che macchine egli non solo ha progettato ed ideato, ma certamente costruito e realizzato, anche se non sempre con successo.

---

(1) FR. ORESTANO: « Leonardo Da Vinci », Roma, 1919.

(2) M. BARATTA: « Leonardo e i Problemi della Terra » - F.lli Bocca, Torino, 1903.

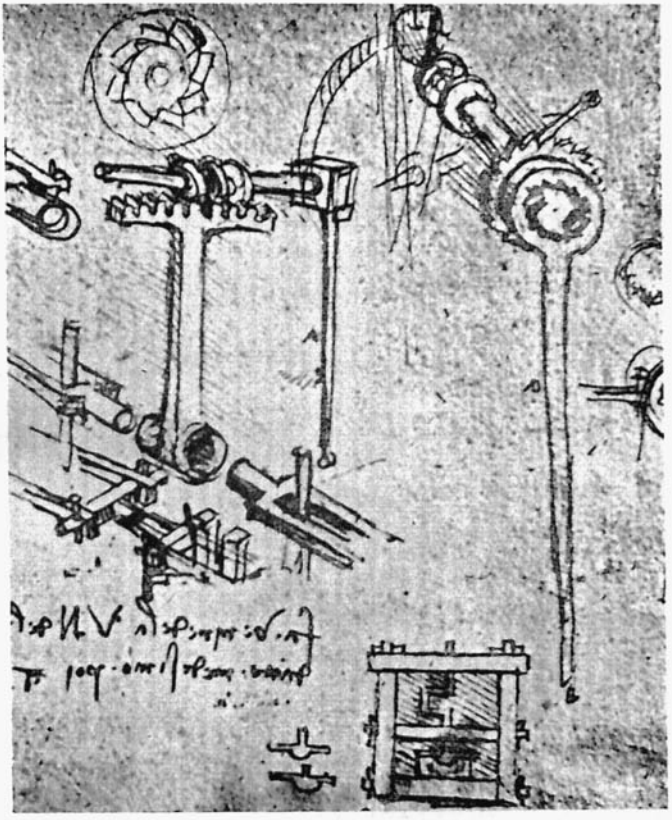


Fig. 24. - Manovella con arpionismo. (Ms. B, 72 r.)

II°

VEICOLI
«DI FACILE MOVIMENTO»

Leonardo non s'è limitato a disegnare e progettare i più diversi tipi di veicoli, ma ha affrontato con metodo il complesso dei più importanti problemi collegati alla locomozione terrestre, particolarmente applicandosi ai carri per trasporti pesanti, ed ai carri da guerra.

Non si ha prima di lui notizia di altri ingegneri o meccanici che si siano particolarmente applicati a questi problemi, e nessuno, comunque, ha saputo impostarli con tanta chiarezza e con altrettanto acume risolverli.

In realtà il veicolo a ruote, fino ai tempi di Leonardo, era rimasto, dal punto di vista costruttivo, all'epoca dei Romani, presso i quali, i mezzi di locomozione avevano raggiunto uno sviluppo eccezionale ed un grado di perfezione notevole. Con la decadenza di Roma, non solo s'arrestano i progressi costruttivi nei mezzi di locomozione, ma si può dire che

scompaia anche il carro a ruote, con la rovina e l'abbandono della magnifica rete stradale dell'Impero.

I trasporti someggiati, le lettighe, le portantine, si sostituiscono ai veicoli a ruote, ed è solo verso il XIII secolo che si riprende l'uso dei carri e delle vetture. Siamo sempre, comunque, nel campo dei veicoli trainati da quadrupedi, di costruzione primitiva, con ruote senza campanatura, e perciò poco resistenti agli urti laterali, montate su assali diritti, senza sospensioni.

Le profetiche parole lasciateci da Ruggero Bacone (1247) nella sua « epistola de secretis operibus artis et naturae »: « si potranno un giorno costruire carri che si metteranno in moto senza l'impiego della forza impellente e della trazione di un cavallo o di altro animale », rivelano che il problema della energia motrice — che non fosse quella muscolare — nei veicoli era presente alla mente degli studiosi del tempo, ma niente pare sia stato fatto, in pratica almeno, fino a Giovanni Fontana, a Jacopo Mariano ed a Roberto Valturio, nel campo dei veicoli meccanici.

Se nulla di preciso si sa circa i carri meccanici che, si asserisce, conoscessero i cinesi, sembra ora accertato in seguito ai più recenti ritrovamenti che gli egiziani abbiano costruito ed impiegato carri a vela a 4 ruote, nei quali la forza motrice era fornita dal vento.

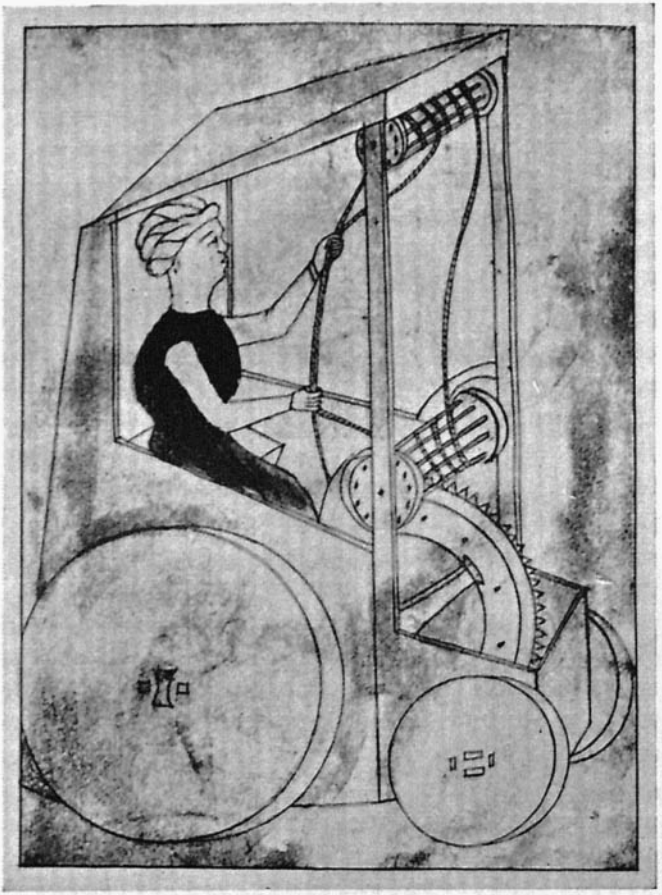


Fig. 25. - Il carro meccanico disegnato da Giov. Fontana (1420).

Il famoso carro a vela costruito dal noto matematico olandese Simone Stevino, per il principe Maurizio, nel 1599, — e che si riteneva il primo del genere — avrebbe dunque avuto ben lontani predecessori.

Le cronache fanno cenno di un carro da guerra senza cavalli, munito di cannoni, e mosso probabilmente da uomini protetti e racchiusi nel carro stesso, che sarebbe stato impiegato da certo Archinger attorno al 1421 all'assedio di Saaz; e di un altro veicolo che avrebbe circolato per le vie della città di Memmingen nel 1447, ma nulla di preciso e di controllato esiste in proposito.

Si tratta probabilmente di parti della fantasia popolare che si ricollegano al racconto biblico del profeta Elia, rapito in cielo sopra un carro trainato da cavalli di fuoco (« quumque pergerent, et incedentes sermocinarentur, ecce, currus igneus, et equi ignei diviserunt utrumque, et ascendit Elias, per turbinem, in coelum »).

Sulla scorta dei documenti noti, è al Fontana (1420) che sembra doversi far risalire il primo carro senza cavalli, nel quale è applicato ingegnosamente un sistema di verricelli — simile a quello adottato nei pozzi per sollevare i secchi d'acqua —. E' lo stesso passeggero, od un servo seduto al suo fianco, che, svolgendo a forza la fune avvolta attorno alla lanterna

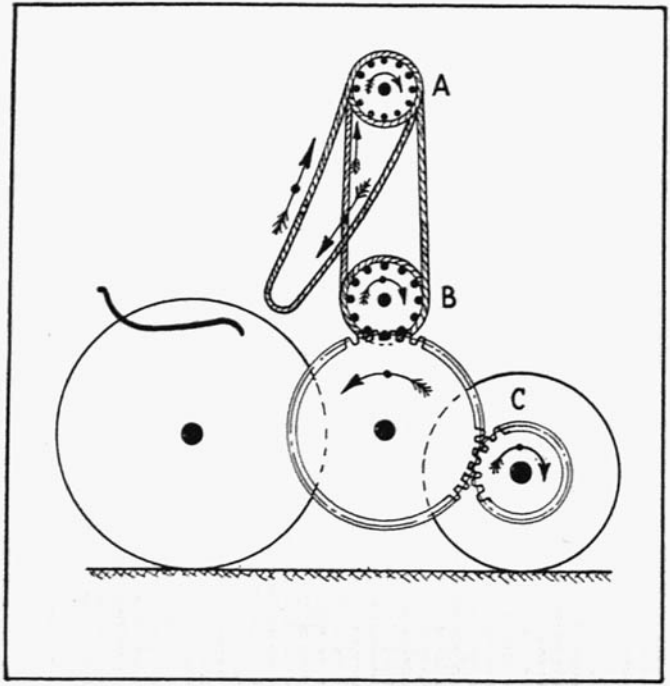


Fig. 26. - Disegno schematico del sistema di trasmissione del carro del Fontana.

(A) fa ruotare l'altra lanterna posta in basso (B), la quale ingrana con una grande ruota dentata che, presumibilmente, stando al disegno, trasmette il moto

all'assale anteriore (C). Si tratta di un veicolo automatico, ma sempre mosso da energia muscolare.

Un passo avanti si fa invece con il carro automotore che Jacopo Mariano (1449) esattamente riproduce da Roberto Valturio (1472), nel quale l'energia motrice è fornita, o dovrebbe essere fornita, dalla forza del vento, che imprime il moto rotatorio a due ruote a ventola (palmole), munite di ruote a lanterna ingrananti con un sistema di tre ruote dentate. Oltre all'idea di impiegare, per muovere questo carro, la forza del vento, è interessante in questo veicolo primitivo, l'impiego delle 4 ruote motrici.

Siamo sempre, comunque, nel campo dei tentativi, anche se racchiudenti in germe l'idea della adozione di una forza motrice indipendente dall'impiego del cavallo, il grande dominatore della locomozione, fino all'avvento della macchina a vapore e del motore a scoppio.

Sia nel disegno del Fontana che in quello del Mariano, non c'è nulla che lasci intravedere la impostazione razionale dei diversi problemi che si collegano alla locomozione, che sarà Leonardo ad affrontare per il primo nei suoi veicoli bellici, od impiegati negli usi militari, i quali anzi, all'inizio, appunto al Valturio (1413-1483) o al Mariano si ispirano.

Leonardo, infatti, non solo conobbe il « De Re Militari », che è la prima opera di ingegneria militare data

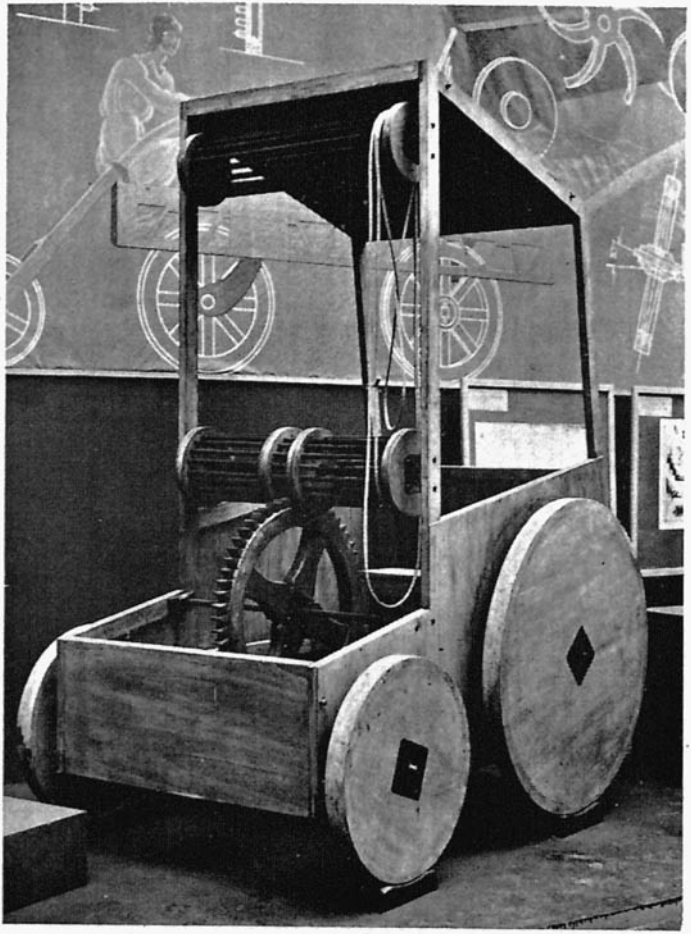


Fig. 27. - Il carro del Fontana ricostruito per la Mostra delle Invenzioni Italiane.

alle stampe, ma ad essa largamente attinse al principio della sua carriera di ingegnere militare di Lodovico il Moro.

E' pertanto probabile che Leonardo oltre all'opera del Valturio conoscesse anche il De Machinis di Jacopo Mariano detto il Tàccola che ci lascia in 233 tavole una serie interessantissima di disegni di macchine da guerra, di ponti, di veicoli, di macchine da sollevamento, di macchine idrauliche. Poichè nei codici vinciani si ritrovano riprodotti alcuni disegni del Tàccola, che non si trovano nelle tavole del De Re Militari di Valturio, si deve ammettere che Leonardo abbia avuto modo di consultare il Ms. del notissimo meccanico senese soprannominato al suo tempo « Archimede ».

I Ms. del Mariano che attualmente si conoscono sono: quello conservato alla Biblioteca Marciana di Venezia, che risale al 1449 e quello esistente presso la Biblioteca di Monaco che reca le date del 1438 e del 1441.

È opinione degli storici che il Mariano si sia ispirato al De Re Militari del Valturio per alcune sue tavole; comunque Leonardo alcuni suoi disegni ha tratto dal meccanico senese, come quella del carrello da noi riprodotta, che non si trova nel libro del Valturio. Resta naturalmente da stabilire a quali fonti abbia, a sua volta, attinto il Tàccola.

Precisamente nel campo dei veicoli bellici, ba-

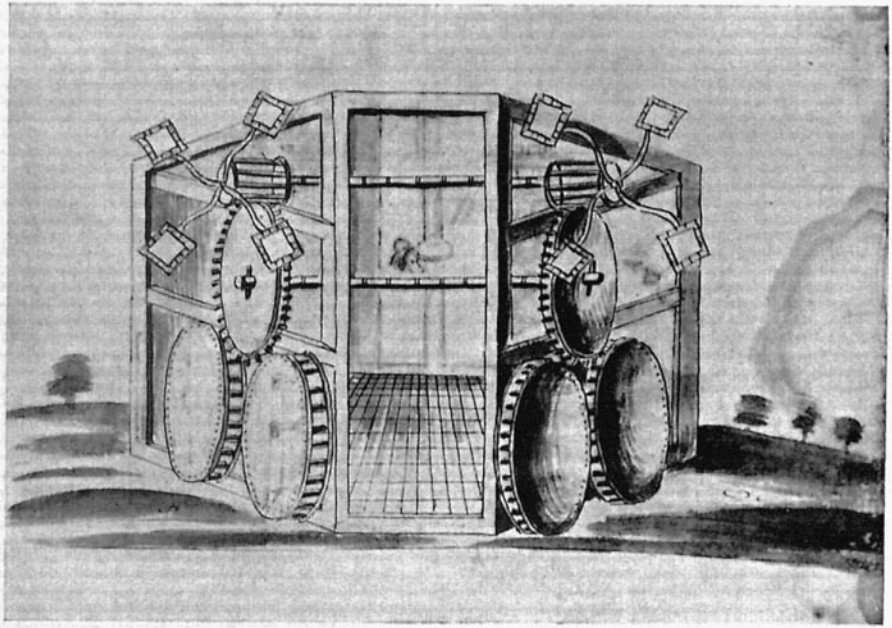


Fig. 28. - Il carro automotore a ventole disegnato da Valturio e Mariano, da una tavola del De Machinis (1449).

sterà citare il brano descrittivo che accompagna il disegno del carro falcato, riprodotto sul foglio 10 recto del Ms. B della raccolta dell' Institut de France, che si fa appunto risalire al periodo 1484-1489. Esso non è che una traduzione quasi letterale di quanto scrive Roberto Valturio, sotto la sua tavola riproducente al Lib. X (pag. 231 dell'Edizione del 1532 - Parisiis) due carri falcati, uno trainato da buoi, l'altro da cavalli. Scrive infatti Leonardo sotto il movimentato disegno del suo carro falcato trainato da due coppie di cavalli: « Questi carri falcati furono in diverse maniere e spesso fecero non meno danno agli amici che ai nemici. Con questi i capitani degli eserciti credendo di perturbare le squadre delli nemici creano la paura e il danno fra i loro. Contro questi carri bisogna usare arcieri, fiondatori, e lanciatori a tirare ogni maniera di dardi, lance, sassi, fochi, romori di tamburi, grida, e tali operatori stieno sparti acciò le falci non li trovino, e per questo si spaventerà li cavalli i quali sfrenati si volteranno fra i loro a dispetto dei governatori e sieno di grande impedimento e danno a' suoi medesimi. I romani usavano contro questi li triboli di ferro seminati che impedivano i cavalli i quali caduti in terra per la pena lasciavano i carri senza moto ».

E Valturio: « His quadrigis ut semper duces hostium acies perturbaturos se credebant, in suas terro-



Fig. 29. - Carro falcato a cavalli di Leonardo (Ms. B-10 r.)

rem persaepe verterunt, ut Antiocho maxime contigit. Nam Eumenes ubi eas vidit, haud ignarus pugnae, et quam anceps esset auxilii genus, si quis pauorem magis iniiceret quam iusta adoriretur pugna, sagittarios funditoresque et iaculatores equitum non confertos, sed quam maxime posset dispersos executere iubet, et omnibus simul partibus tela ingerere. Haec velut procella, partim clamoribus dissonis ita costernavit equos, ut repente velut effrenati passim incerto cursu vagarentur. Romani murices ferreos in terra fundebant qua hostes emissuros quadrigas arbitrabantur; in quos cum incidissent paulo post faucii, pigri inutilesque reddebantur. Est et alia mirifica bellici currus non falcati forma, flabellis ventoque in hunc modum adacti ».

Periodo che termina appunto con l'accenno a quella « mirifica forma » di carri adatti ad essere mossi dalla forza del vento, che nel Mariano e nel Valturio molto rudimentalmente sono riprodotti, — come vedemmo più sopra, accennando a questo carro automotore — e sul quale senza dubbio Leonardo deve essersi soffermato, per arrivare, come vedremo, a soluzioni ben più ardite e più razionali. Di esse due — che in ordine di tempo debbono seguire il disegno del carro falcato del Ms. B, Fol. 10 r. sopra citato, — troviamo nel bellissimo disegno della tavola 18788 Vol. 73 del British Museum, assegnata al periodo 1482-1489. In questa ta-

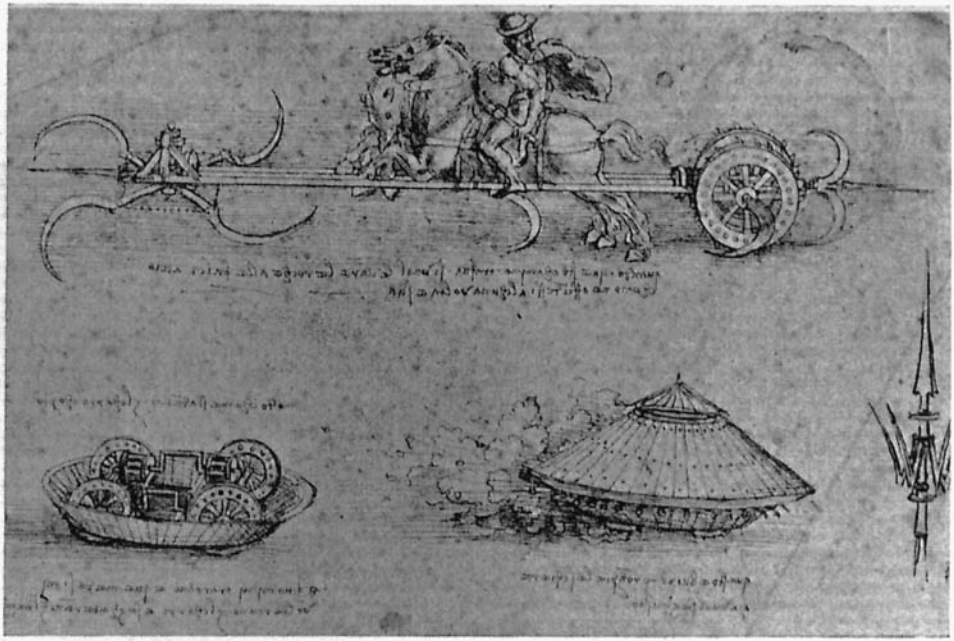


Fig. 30. - Carro falcato e testuggine da una tavola del British Museum.

vola Leonardo disegna un carro falcato trainato da due cavalli, e la famosa testuggine o carro blindato; due veicoli da guerra nei quali prospetta due diverse soluzioni, per ovviare all'inconveniente, già da Valturio rilevato, per cui questi carri « spesso fecero non meno danno agli amici che ai nemici ».

Nella prima soluzione Leonardo adotta ancora il sistema del traino a cavalli, ma concepisce la elegante applicazione delle falci rotanti anteriormente e posteriormente, ponendo, entro certi limiti, i cavalli al riparo dalle offese nemiche, e rendendo molto più micidiali queste falci, che erano fisse — o solo applicate alle ruote — nei carri di Valturio e dei suoi predecessori. Studiando un ingegnoso ed ardito sistema di trasmissione a mezzo di una corona di piuoli rotante con l'assale delle ruote, ed ingranante con una lanterna montata su un lungo albero di trasmissione portante alla estremità anteriore una corona di piuoli terminale, egli riesce a trasmettere il moto alle quattro falci a mezzo di un'altra lanterna.

Nella seconda soluzione, concepisce senz'altro la abolizione dei cavalli, già prospettata come vedemmo da Mariano e Valturio, ma segue una via più pratica, perchè non si affida alla forza del vento, indubbiamente insufficiente. E disegna quella bellissima « testuggine » che aveva preannunciato nella sua lettera a Lodovico Sforza nel 1484, nei seguenti termini: « item

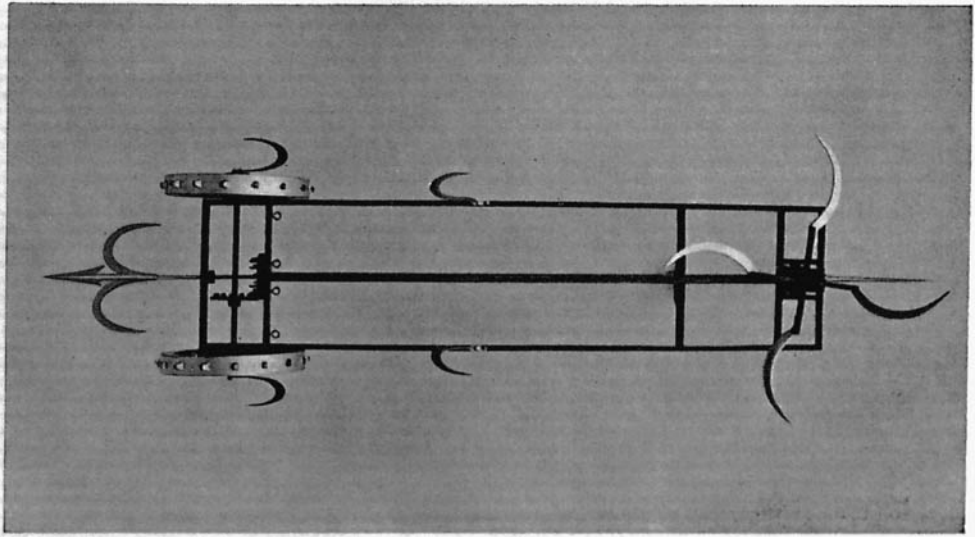


Fig. 31. - Modello ricostruito del carro falcato di Leonardo visto dall'alto.

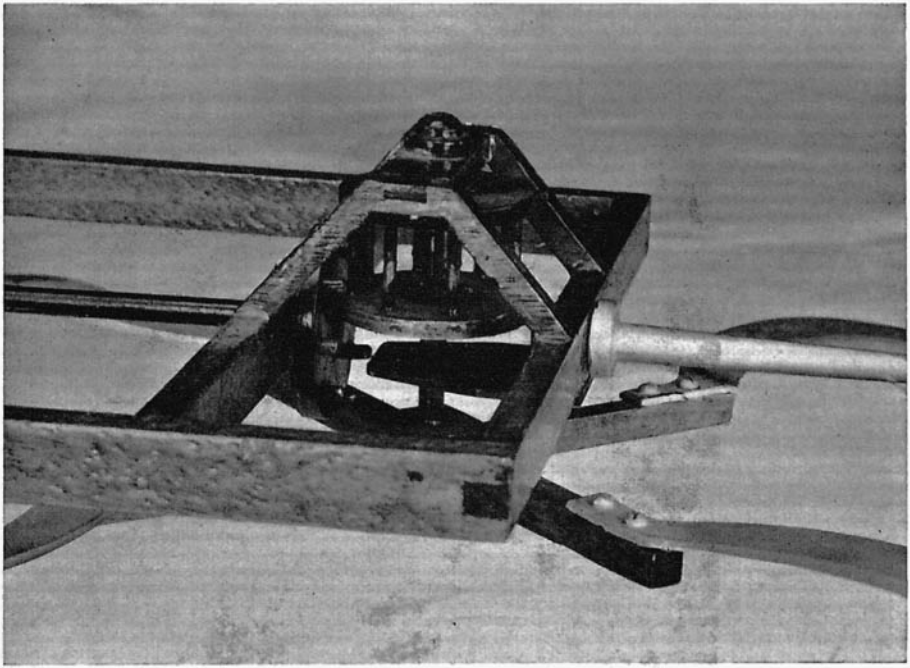


Fig. 32. - Castello di sostegno della trasmissione alle falci rotanti anteriori del carro falcato (ricostruzione).

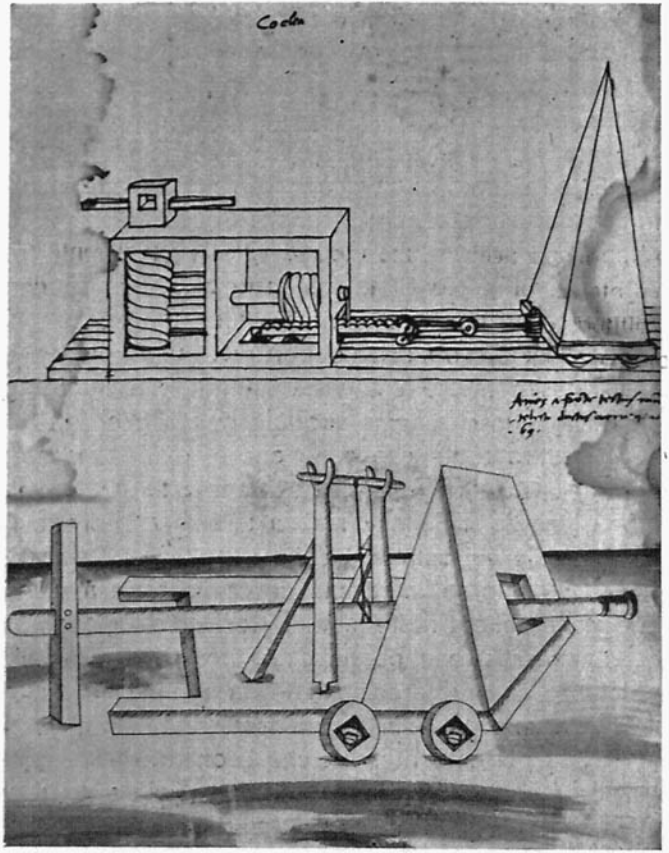


Fig. 33. - Carrello per trasporto di colonne ed obelischi disegnato da Jacopo Mariano.

farò carri coperti e sicuri inoffensibili e' quali entrando intra li inimici con sue artiglierie, non è sì grande moltitudine di gente d'arme che non rompessino. E dietro a questi potranno seguire fanterie assai illese e senza alcuno impedimento ».

E che si tratti di un « carro di rottura » ripete sotto uno dei due disegni scrivendo: « questo è buono a rompere le schiere, ma vuol séguito », affermando tra l'altro un principio di tattica militare riaffiorato con l'impiego dei moderni carri d'assalto.

Di questo suo « carro coperto » Leonardo disegna nella stessa tavola una vista interna che mette in luce l'ingegnoso sistema adottato per la trasmissione sulle quattro ruote che sono anche, evidentemente, direttrici. Questa trasmissione azionata da « 8 huomjni », Leonardo ottiene a mezzo di due alberi a manovella, alle cui estremità sono rispettivamente montate due lanterne ingrananti con la corona a piuoli di ognuna delle 4 ruote motrici. Così com'è disegnata questa trasmissione peraltro risulterebbe inoperante perchè le due ruote comandate da ognuna delle manovelle, ruoterebbe in senso contrario.

Deve pertanto ritenersi che Leonardo, unicamente per maggior chiarezza, abbia disegnato le due lanterne di ogni manovella dalla stessa parte, mentre avrebbe dovuto disegnarle operanti una all'interno e l'altra all'esterno di ciascuna coppia di ruote.

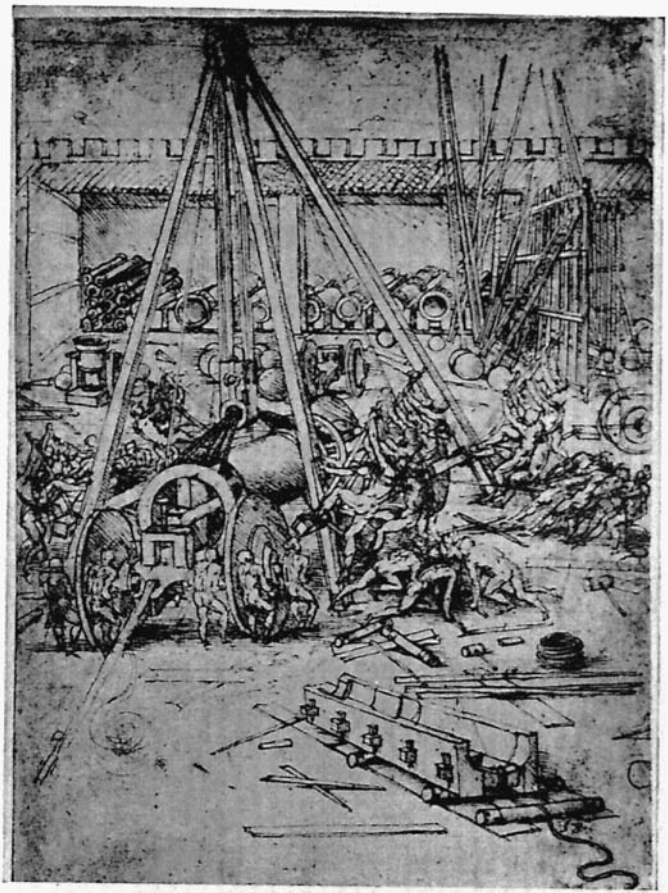


Fig. 34. - Carro per trasporto di una bombarda colossale (B. M. - 12647)

Poichè, come vedremo anche a proposito del carro automotore, questo procedimento grafico si ripete in altri suoi disegni, dobbiamo dedurne che egli in taluni casi, si preoccupasse più di ottenere la comprensione immediata del funzionamento del suo meccanismo, che la esatta rappresentazione grafica e costruttiva. Ed è un rilievo del quale va tenuto conto nella interpretazione di alcuni suoi disegni di macchine, eseguiti più obbedendo all'estro della ispirazione che alle precise esigenze della costruzione.

Sempre nel campo dei veicoli militari, Leonardo s'è trovato di fronte alla realtà di problemi molto importanti e che richiedevano soluzioni pratiche di indole costruttiva, come nel caso del trasporto di grandi pesi, che imponeva la costruzione di veicoli molto robusti, e di notevoli dimensioni e talvolta di foggia adatta al genere particolare ed alla mole del carico.

Il trasporto della grande bombarda, illustrato nella magnifica tavola della Raccolta della Biblioteca Reale di Windsor (N. 12.647), e quello della grande balestra disegnata al foglio 53 V-ab. del Codice Atlantico costituiscono due esempi interessantissimi e rivelano soluzioni precorritrici.

Nel trasporto della bombarda colossale, la quale stando alle proporzioni del disegno, doveva avere un calibro di circa 1,40 m. ed una lunghezza di canna

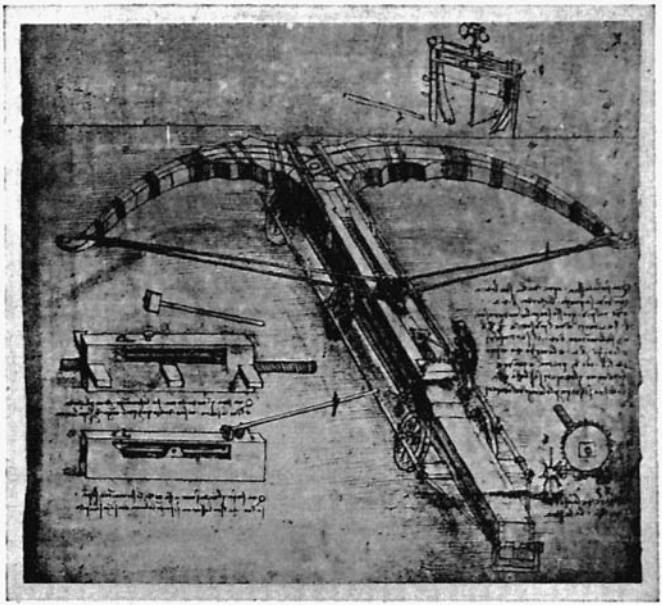


Fig. 35. - Grande balestra. Disegno di Leonardo (Cod. Atl. 53 V ab)

di m. 4,50, Leonardo dovette risolvere, non solamente il problema del carico e del piazzamento sul veicolo di questo enorme ordigno di guerra, ma anche quello della resistenza degli assali e delle ruote. Come egli abbia risolto la questione del carico e del piazzamento è chiaramente visibile nel disegno: armata

l'anima della bombarda con una trave centrale, la sospese su due enormi carrelli a due ruote, secondo il sistema tutt'ora in uso presso i carrettieri che trasportano grossi tronchi d'albero, e in questi carrelli adottò, necessariamente, ruote che dovevano misurare non meno di m. 2,50 di diametro. Ma poichè si trattava di trasportare un carico non inferiore a 50 o 60 quintali, pari cioè a circa 15 ql. per ruota, adottò ruote a disco robustamente cerchiate, aventi da 12 a 14 centimetri di larghezza del cerchione, e solidamente rafforzate al mozzo da elementi tronco conici. Può apparire forse insufficiente, stando alle dimensioni del disegno, la cerchiatura di queste ruote sottoposte ad un carico così notevole, e sarebbe stato interessante potere avere maggiori particolari costruttivi sulla struttura di queste grandi ruote, sottoposte, oltre tutto, agli immancabili urti laterali, ma è comunque sufficiente rilevare, osservando il disegno, che Leonardo aveva adottato ruote a disco, a sezione tronco-conica, che preludono alla ruota campanata, la quale segna una delle grandi tappe nel processo evolutivo della ruota.

Anche in altri veicoli Leonardo sembra adottare la ruota con campanatura, comunque è certo che egli s'è prospettato il problema della resistenza laterale della ruota, come può dedursi osservando il secondo grande ordigno bellico, al quale abbiamo sopra ac-

cennato, e che è noto sotto il nome di « grande balestra » (Fol. 53 V-ab. Cod. Atl.).

Di questa macchina da guerra, Leonardo dà, oltre al disegno, con alcuni particolari, anche le dimensioni. Essa misura m. 24,52 di larghezza, m. 23,36 di lunghezza; il suo fusto ha una larghezza di m. 1,168, e le braccia della balestra sono di m. 0,95, nella sezione più larga, e di m. 0,40, nella sezione meno larga. Il problema del trasporto di questo colossale ordigno, che non doveva pesare meno di 40 quintali, dovette certamente preoccupare la mente di Leonardo, non tanto per il peso da trasportare, quanto per il suo assetto, date le dimensioni non comuni. E' infatti presumibile che egli abbia subito intuito, o sperimentato attraverso la costruzione stessa, che la maggiore difficoltà da superare, stava non già nella distribuzione del peso sugli assali e sulle ruote, ma nella riduzione degli inevitabili movimenti di serpeggio e di rollio di siffatto veicolo, i quali sottoponevano le ruote a notevolissimi e bruschi sforzi laterali. La soluzione da lui trovata, dimostra comunque che alla sua mente il problema si affacciò, e che egli lo risolse con quella ingegnosità che gli è propria.

Egli infatti adottò: 1°) sei ruote invece di quattro, ottenendo non solo una distribuzione meno gravosa del peso totale sugli assali, ma riducendo anche l'effetto dei moti irregolari del veicolo e delle rela-

tive forze di inerzia; 2°) una ampia carreggiata che può ritenersi non inferiore ai m. 2,50; ed infine le ruote montate su fusi inclinati e probabilmente orientabili, almeno per quello che può dedursi dal disegno.

Ora, se la campanatura sembra possa farsi risalire ad alcune ruote di affusti di artiglieria del 1430, non si hanno esempi precedenti a questo di Leonardo, circa la applicazione delle ruote a fuso inclinato, che rappresenta nella tecnica costruttiva dei veicoli, il necessario complemento della campanatura. Infatti se la ruota semplicemente campanata e cioè con raggi montati sul mozzo secondo una superficie conica, resiste più facilmente alle spinte assiali, od urti laterali, venendosi a disporre i raggi secondo la risultante del peso del veicolo e della spinta assiale, non è men vero che essi vengono sollecitati a flessione sotto l'azione del peso e lavorano quindi nelle condizioni meno favorevoli. E' appunto inclinando il fuso della ruota che si ovvia a questo inconveniente, disponendone, con la campanatura, le razze normali al terreno (qualora l'angolo di inclinazione del fuso sia eguale all'angolo di inclinazione dei raggi), e nelle condizioni quindi di essere sollecitati, dal peso del veicolo, a pressione.

La ruota campanata con fuso inclinato è entrata nella pratica solo nei tempi moderni, ma s'è invece sviluppata nei veicoli dal XVI al XVIII secolo la di-

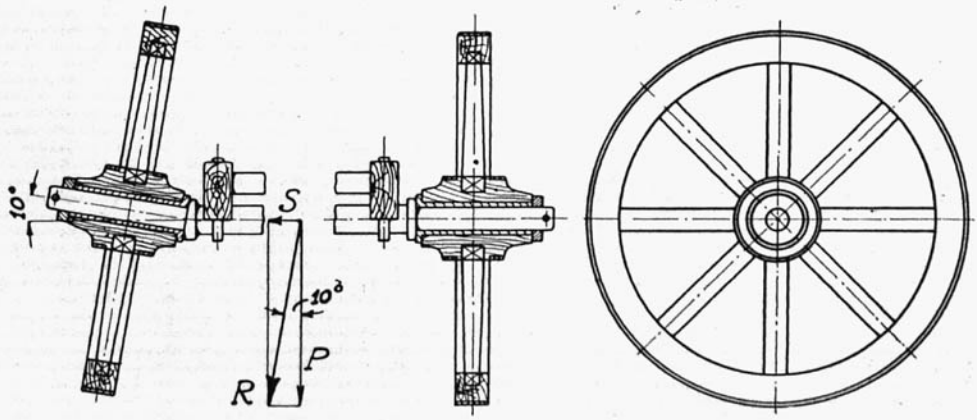


Fig. 36. - Schema della ruota a fuso inclinato.

sposizione leonardesca della ruota diritta con fuso inclinato, con la quale si ottiene lo scopo di ridurre le oscillazioni e quindi gli urti laterali, con il doppio vantaggio di diminuire le sollecitazioni laterali della ruota, e le malagevoli scosse del veicolo. E in gran parte delle carrozze di questo periodo si può appunto osservare che le ruote non sono parallele, ma montate come sulla grande balestra di Leonardo, con inclinazione opposta a quella che hanno le ruote delle nostre automobili, divaricate cioè in modo da avere una carreggiata maggiore della distanza fra i due mozzi.

Di ruote con campanatura delle razze, c'è anche un accenno nel disegno del foglio 376 R. c. del Cod. Atl. nello schizzo di un carro con assale su rulli, del quale avremo occasione di parlare più diffusamente. In generale però Leonardo nei disegni dei suoi veicoli, accenna alle ruote tracciando le semplici circonferenze, come nei numerosi affusti di macchine da guerra o per bombarde, e nei non meno numerosi veicoli da trasporto, si tratti dei tricicli per trasporto di cannoni o dei carri pel trasporto di grosse campane.

Quando disegna la ruota a razze, adotta di preferenza la raggiera a sei, od otto razze (carro falcato del Museo di Windsor, assale con ruote del foglio 4 V. a. del Cod. Atl.). Non mancano peraltro

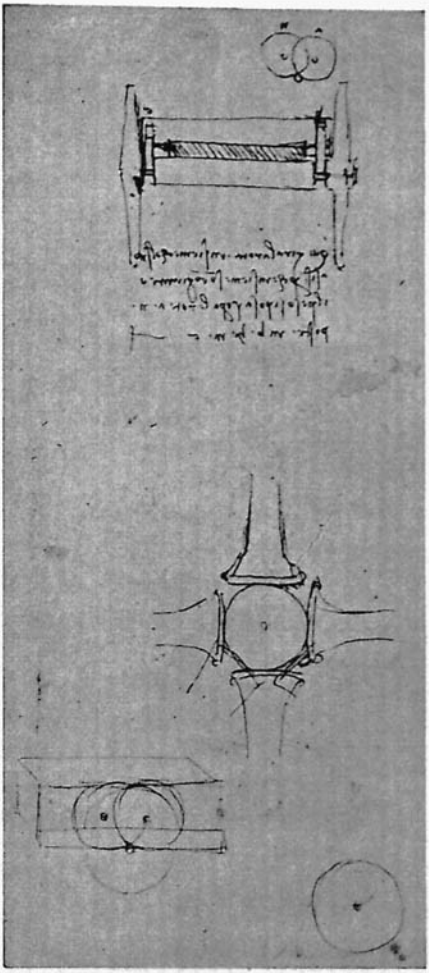


Fig. 37. - Assale per carro su rulli (Cod. Atl. 376 R.c)



Fig. 38. - Ruota con contamiglia (Cod. Atl. 312 Va)

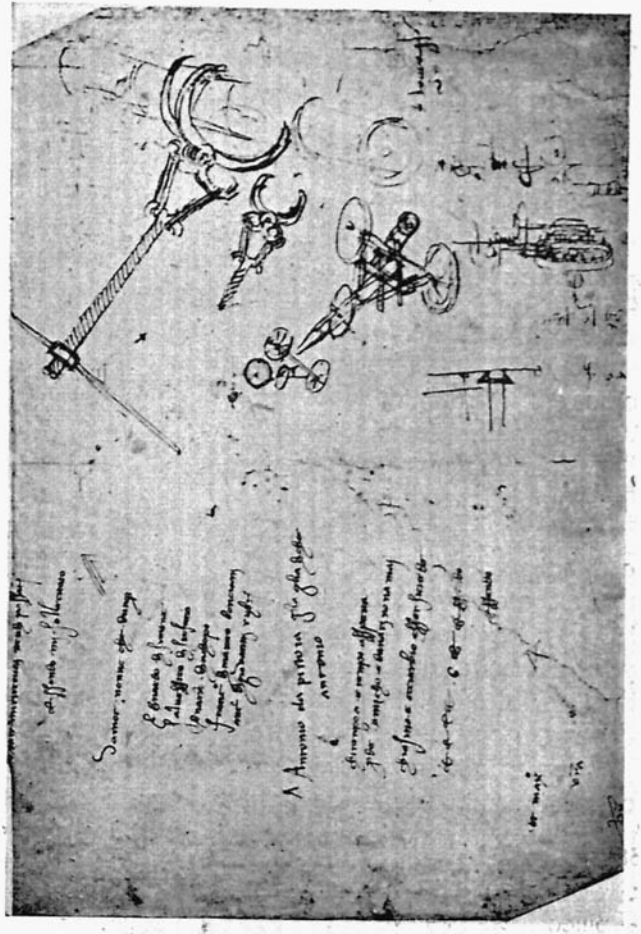


Fig. 39. - Tricicli per trasporto di bocche da fuoco.

gli esempi di ruote a 10 o più raggi, come nel caso dell'odometro della tavola 1 R-ab. del Cod. Atl. e del carro con contamiglia del foglio 312 V-a. del Cod. Atl.

Le ruote a razze di Leonardo sono di norma robustamente progettate, con mozzi torniti, cilindrici, o di forma tronco-conica, e con razze prismatiche a sezione costante, o di forma piramidata. La loro cerchiatura, sempre solida, appare di preferenza fissata al gavello con chiodatura esterna regolare, e qualche volta con chiodi a testa molto sporgente, aventi lo scopo evidente di assicurare l'aderenza, come nel caso del carro falcato, della tavola del Museo di Windsor, nel quale le ruote azionano la trasmissione del sistema rotante delle falci.

Particolarmente ingegnosi sono tra questi veicoli i tricicli, sui quali sono adattati apparecchi di presa e di sollevamento (Cod. Atl. f. 34 v. a. ed f. 4 r. b.), e la ruspa o carretta che troviamo disegnata al foglio 389 V. c. del Cod. Atl. e che deve ritenersi uno dei primi esempi di quella che oggi si chiama la carretta a bilico. Già nel Mariano c'è però un disegno di carretta a due ruote, ma senza il fondo apribile.

Leonardo ha razionalmente concepito questo veicolo adottando una cassa portata a bilico sull'asse delle ruote per modo che quando essa è carica di materiale, trovandosi il suo fondo disposto orizzontalmente per la forma data alle stanghe, la verti-

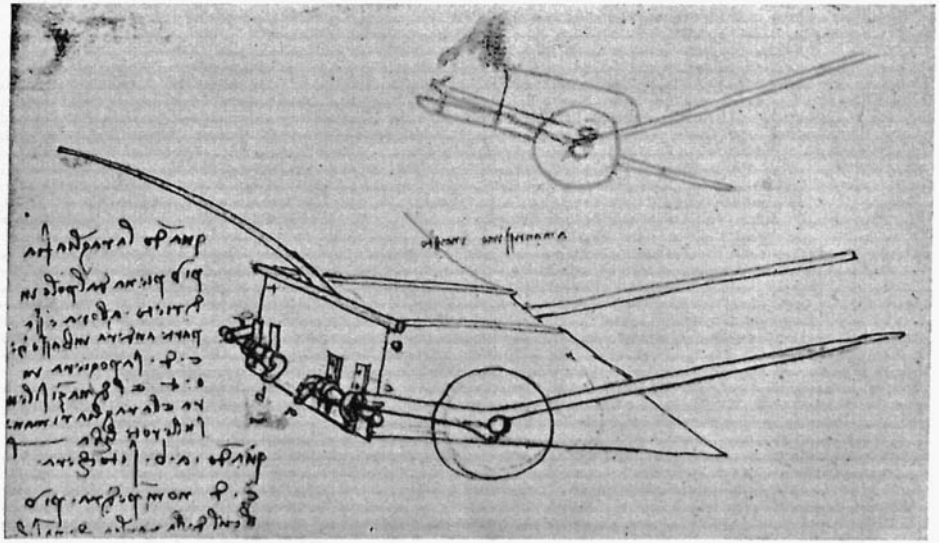


Fig. 40. - Carretta a due ruote con fondo apribile (Cod. Atl. 389 Vc.)

cale baricentrica passa per l'asse. Al pari delle attuali carrette a bilico poi, questa ruspa leonardesca presenta un facile e pratico sistema di apertura del fondo della cassa, in modo che sia agevole il versamento del materiale in essa contenuto, inclinandola in avanti. Leonardo scrive appunto sotto il disegno: « quando a-b si toccherà, c-d non impedirà più il cul della raglia che non si levi e che non versi ».

Multiformi sono le applicazioni di Leonardo in questo campo dei veicoli che potremmo chiamare utilitari, o addirittura industriali, e nel quale egli può ritenersi un precursore.

I problemi del sollevamento e del trasporto dei grandi pesi sono tra quelli che occupano più frequentemente la sua mente, ed in taluni casi, egli ci offre delle soluzioni elegantissime ed originali, come quella disegnata al Fol. 77 r. del Ms. B, nella quale progetta un carro per il trasporto ed il sollevamento di una grossa campana. A tal uopo egli immagina per sollevare il carico, di servirsi della forza di trazione dei cavalli, e progetta di costruire sul telaio stesso del veicolo una incastellatura o capra, come si vede nella figura a sinistra, al vertice della quale è la carrucola od il paranco che dovrà sollevare la campana.

Il sistema dei verricelli che dovrà azionare questo paranco è ingegnosissimo; infatti applicando ai due assali del carro, che sono solidali colle ruote infe-

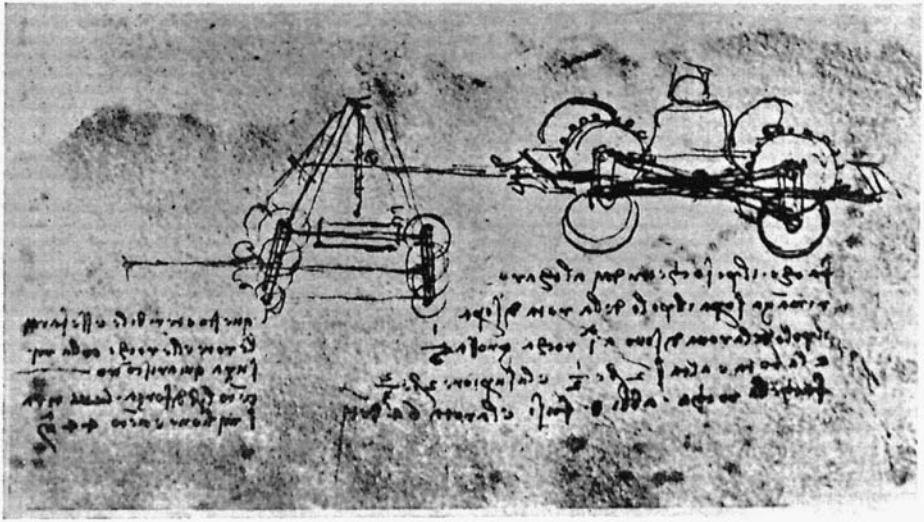
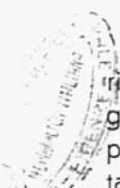


Fig. 41. - Carro per trasporto e sollevamento di grosse campane
(Ms. B-77 r.)



riori o portanti, due rocche o lanterne di 8 denti ingranano con due grandi ruote di 64 denti piazzate superiormente, sulla verticale dei centri, egli aziona i tamburi dei verricelli, che sono solidali a queste grandi ruote dentate, impiegando le ruote stesse del carro trainato — come bracci delle manovelle dei verricelli. In altre parole, le ruote del carro fungono da manovelle, e le rocche o lanterne da rocchetti che ingranano con la ruota del verricello, sul tamburo della quale si avvolgono le funi di tiro.

Leonardo con questo sistema calcola di sollevare pesi enormi e scrive infatti: « questo è terribile, e se farai le rote e le rocche colla misura quì a riscontro, cento libbre di forza tirano un milione e cento 44 mila ».

E' naturale che occupandosi dei trasporti pesanti Leonardo si sia trovato a dovere affrontare i problemi della resistenza dei suoi veicoli e quelli della trazione, per la quale non disponeva che della forza muscolare dei motori animati, particolarmente vulnerabili nei veicoli destinati ad impieghi bellici.

Un altro dispositivo — simile nel concetto fondamentale — Leonardo disegna alla tavola 76 v. del Ms. B. In questo caso egli concepisce « un carro di comodo movimento », ossia che offra una relativa resistenza alla trazione; ed invece di applicare direttamente alle ruote portanti lo sforzo di trazione

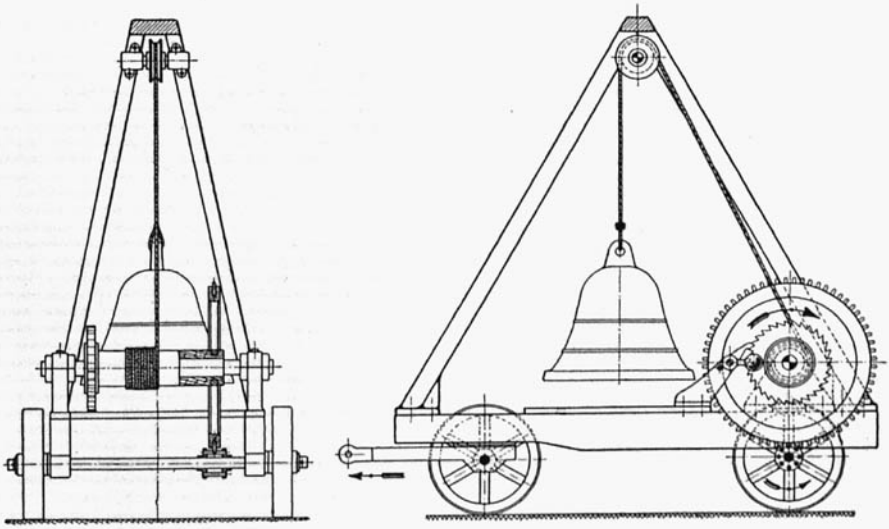


Fig. 42. - Ricostruzione del carro per trasporto di campane.

immagina di azionare queste ruote portanti per mezzo di due coppie di ruote dentate — indicate nel disegno con le lettere **a-b** — delle quali la più alta **a** ingrana con la « rocca » della ruota intermedia **b,** e quest'ultima con la « rocca » o rocchetto dentato della terza **c,** che è la portante. Si tratta nel complesso di un rotismo ordinario a tre assi con rapporto di trasmissione moltiplicatore, nel quale la ruota conduttrice è la **a,** ossia quella posta in alto, la quale — stando alla annotazione di Leonardo — dovrebbe essere messa in moto a mezzo di un peso a caduta appeso ad una fune avvolta attorno al suo assale a tamburo. Ed uno schema consimile troviamo, con particolari, nei disegni del foglio 2 V. del Ms. 2037 dell'Istituto di Francia, nel quale è schizzato un altro « modo di carro facile a tirare ». A fianco di un ruotismo simile al precedente, disegnato nella parte inferiore di questo foglio, Leonardo scrive infatti: « questo è meglio che la rota grande ». Egli stesso però rileva ed annota, che su terreni molli, ossia quando la resistenza aumenti sensibilmente « è difficile movere il perpendicolare della rota ».

In questi due veicoli siamo dunque in presenza di un sistema di trazione indiretta o funicolare nel quale si impiegano degli argani per aumentare lo sforzo di trazione animale o muscolare, ed è evidente che Leonardo si ispira alle manovre marinare.

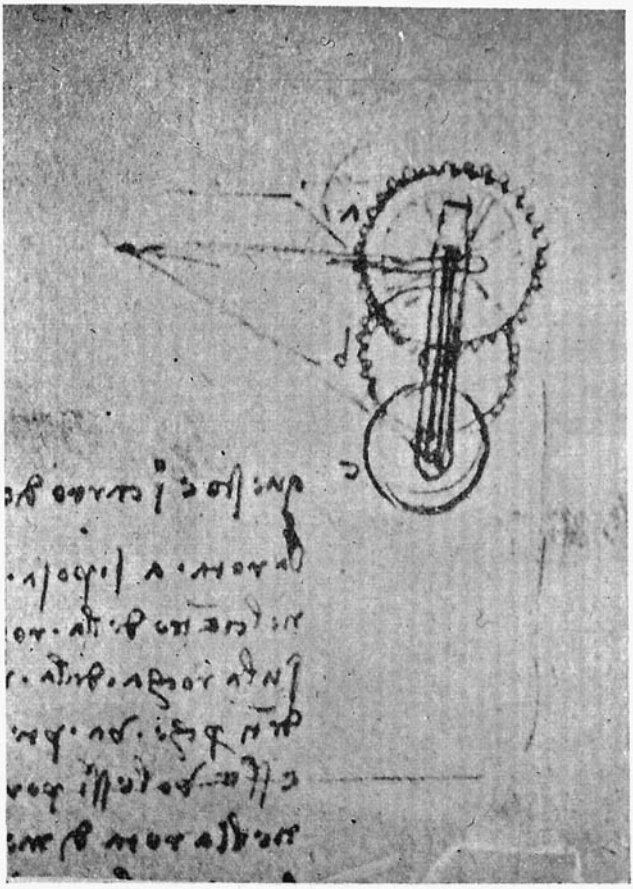


Fig. 43. - Disegno schematico di un sistema di trazione indiretta (Ms. B-76 V.)

Egli stesso infatti, descrive sotto uno di questi disegni, la manovra usata qualche volta dai marinai del Tirreno per « mandare alla banda a forza d'argano il naviglio ». E vedremo che anche nel caso del timone del carro automotore, al timone delle navi, evidentemente s'è ispirato.

Che altri prima di lui questi sistemi di trazione indiretta abbiano usato o progettato è probabile e se ne hanno degli esempi nell'opera del Mariano. Altri se ne trovano in opere posteriori: ad esempio nel « Theatrum instrumentorum et machinarum » di Jacques Besson pubblicato a Lione nel 1578.

Come abbiamo già visto, accennando al disegno della testuggine della tavola del British Museum, egli aveva subito pensato di sostituire ai cavalli gli uomini posti al riparo nella blindatura del carro stesso, ed è, probabilmente, perseguendo questa sua idea che ha prospettato le due interessantissime soluzioni che troviamo accennate nelle due tavole del Cod. Atl. ai fogli 4 V-A e 296 V-a. Sotto al primo disegno Leonardo ha scritto: « **a** è il modo di fare volgere le ruote del carro; **b** è quello quadro che imperna la ruota principale », e rappresenta indubbiamente una trasmissione, con corona di piuoli e ruota a lanterna, alle ruote di un carro; nella tavola riferentesi al secondo disegno, noto comunemente come « l'automo-

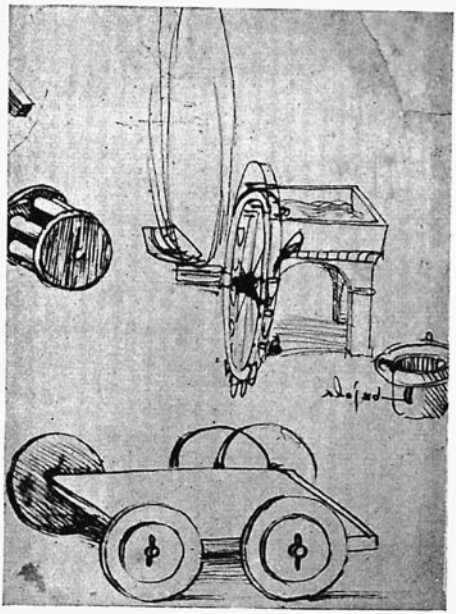


Fig. 44. - Carrello a 4 ruote.

bile di Leonardo », nessun chiarimento e nessuno scritto invece esistono. (Figg. 45 e 48).

Gerolamo Calvi prima e l'Ing. Guido Semenza successivamente si occuparono di questo disegno e, mentre il primo si limitò ad accennare all'ipotesi che esso rappresentasse un carro automotore, l'Ing. Se-

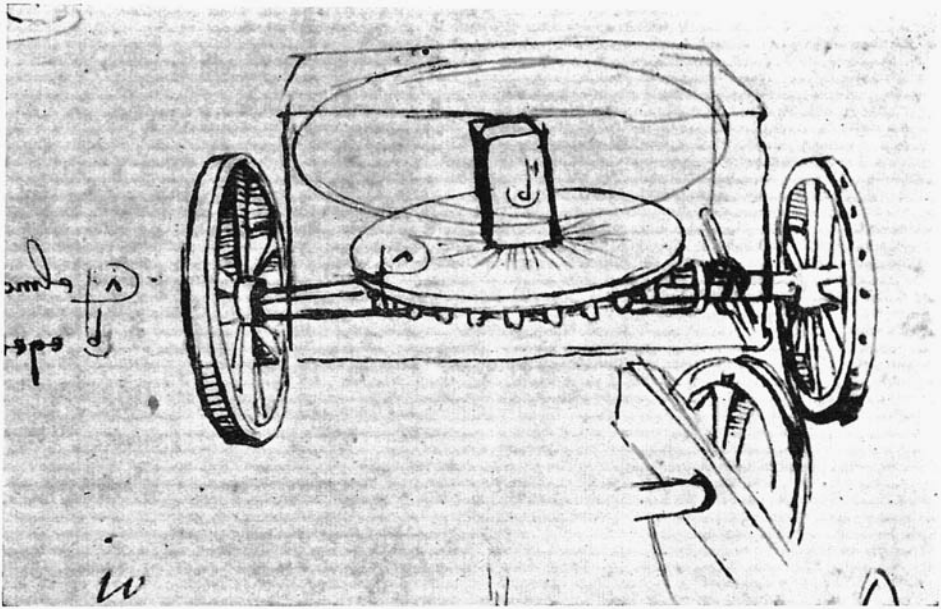


Fig. 45. - Trasmissione per assale posteriore (Cod. Atl. 4 Va)

menza ne fece materia di una interessante trattazione esprimendo fra l'altro il parere che in questo carro automotore, Leonardo avesse effettivamente ideato e disegnato anche il primo meccanismo differenziale nella trasmissione. Pare che l'ing. Semenza avesse tentato di ricostruire questo veicolo, ma purtroppo nulla ci rimane di questo suo appassionato lavoro. Sulla base delle considerazioni fatte dal Semenza, parecchi altri autori si occuparono di questo veicolo, senza però portare alcun nuovo contributo alla interpretazione del disegno Leonardesco.

Il disegno del foglio 4 Va., ora citato, che il Calvi giudica fra i più giovanili del Codice Atlantico, risalirebbe dunque all'incirca al periodo 1482-84, ossia allo stesso periodo al quale si attribuisce il disegno della testuggine, della quale abbiam già parlato. E' nostro parere anzi, che lo studio di trasmissione abbozzato in questo foglio del Cod. Atlantico preceda il progetto del carro blindato a quattro ruote motrici, nel quale Leonardo ha più compiutamente applicato il sistema ideato, migliorandolo sensibilmente.

In questa trasmissione per carro, si ha una grande ruota conduttrice orizzontale, che Leonardo chiama « ruota principale », con corona dentata, la quale ingrana con un pignone a lanterna fissato sull'asse prismatico, al quale sono solidali le ruote, come può anche arguirsi dallo schizzo che si trova subito sotto la

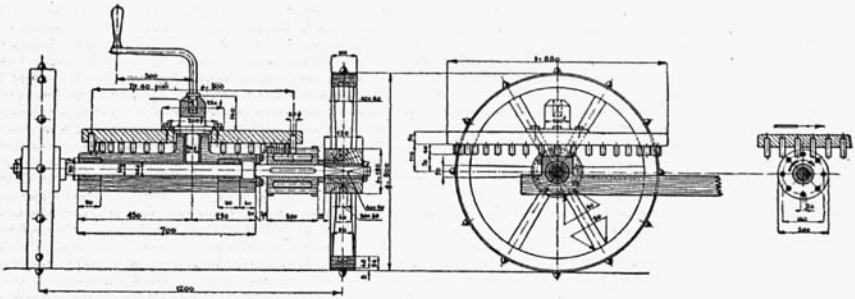


Fig. 46. - Disegno costruttivo del modello della trasmissione del foglio 4 Va del Cod. Atl.

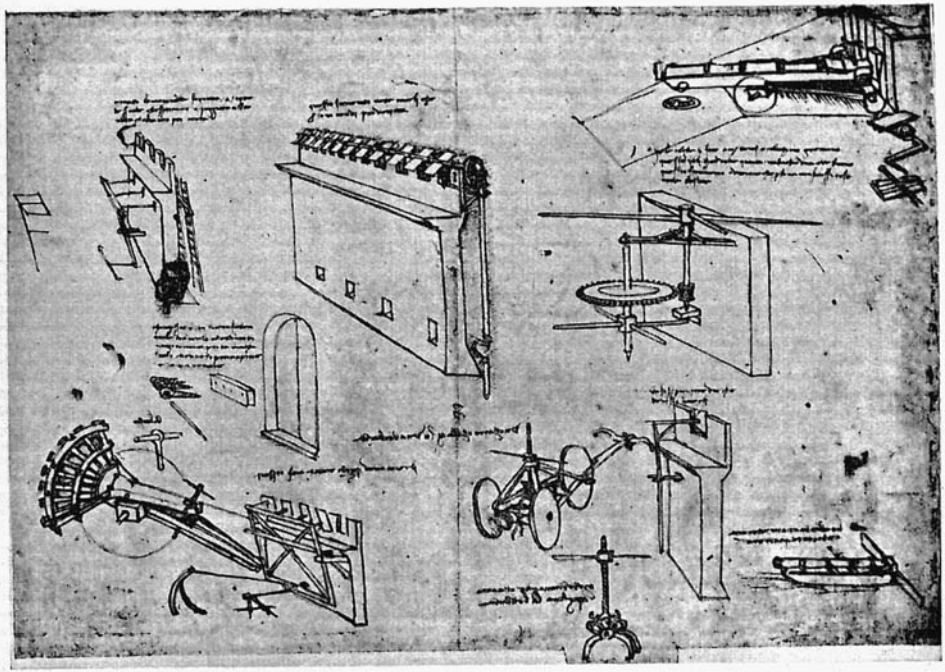


Fig. 47. - Disegno di triciclo per trasporto di pezzi d'artiglieria.

figura principale. Facendo girare la « ruota principale » o conduttrice per mezzo di una manovella o di altro sistema che Leonardo non rappresenta, attraverso il pignone a lanterna si imprime dunque il moto rotatorio alle ruote motrici del carro.

Riferendosi al disegno, mentre la ruota conduttrice ad asse verticale ha 24 denti, il pignone ne ha 8, si ha dunque un rapporto di trasmissione di 24/8 ossia di 3 a 1 e, per ogni giro della conduttrice, l'assale fa tre giri. Assumendo per le ruote del carro un diametro di 60 cm. ne deriva che per ogni giro della ruota conduttrice il veicolo avanzerebbe di m. 5,65.

Siamo dunque in presenza di un vero e proprio schema di trasmissione per un veicolo meccanico od automotore; nel quale peraltro sono evidenti gli inconvenienti derivanti dalla adozione di un rapporto moltiplicatore aggravato dagli attriti alla trasmissione, al rotolamento, ai perni che sono indubbiamente notevoli. Anche se realizzato, un veicolo siffatto richiedeva un impiego di energia motrice non trascurabile.

Ora, è probabile, che Leonardo, maestro nei problemi della leva e delle macchine di sollevamento, abbia subito intuito la poca praticità, e compreso lo scarso rendimento di questa trasmissione, ed abbia voluto risolvere il problema per altra via, invertendo cioè gli organi della trasmissione e ricorrendo all'impiego ausiliario di molle che integrassero lo sforzo

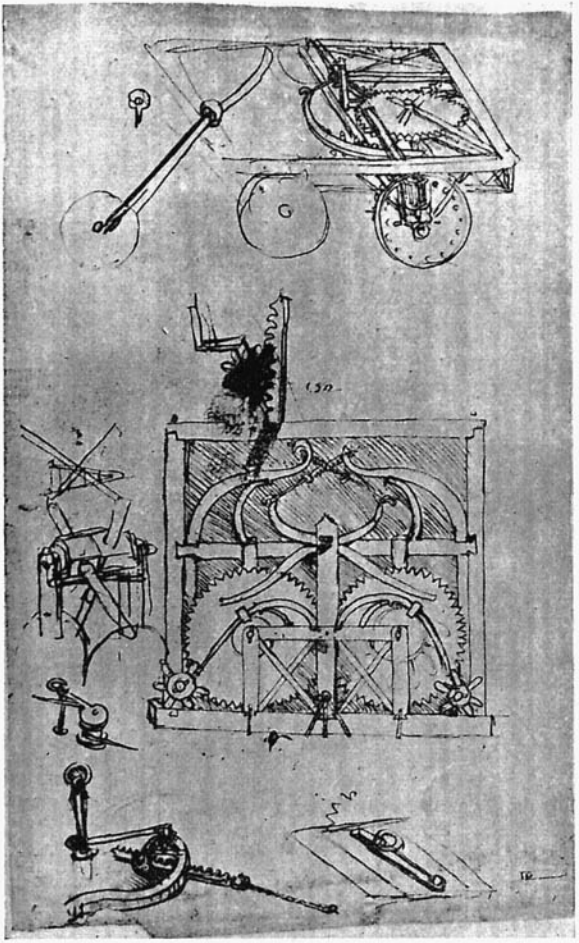


Fig 48. - Carro automotore (Cod. Atl. 296 Va.)

muscolare dell'uomo o degli uomini, che dovevano necessariamente venire adibiti alle manovelle delle ruote conduttrici.

Appare così naturale che egli sia arrivato alla ideazione del famoso veicolo automotore, del foglio 296 Va. del Cod. Atl., sopra citato, che deve essere stato disegnato nello stesso periodo, e cioè tra il 1482 e il 1484. Fig. 48).

Avvicinando così i disegni di questi veicoli, che sono tra i più caratteristici ed attraenti dei molti che il grande precursore ha progettato, si è necessariamente portati a concludere che egli ad essi è arrivato, con la straordinaria lucidità del suo genio, attraverso una logica di ragionamento, di calcolo, di prove sperimentali, che alle sue invenzioni e scoperte conferisce il crisma del metodo, smentendo una volta di più quanti sostengono che le sue macchine sono parto della accesa fantasia di un artista, oppure esercitazioni grafiche d'uno spirito irrequieto.

Al carro automotore, come alla testuggine a 4 ruote motrici e direttrici, Leonardo è giunto — a nostro avviso — attraverso un chiaro processo evolutivo del suo pensiero. Dopo avere vagliato le difficoltà che si incontravano nella costruzione dei suoi veicoli senza cavalli, dopo avere rilevato la entità delle resistenze che si opponevano al loro moto, non potendo disporre che della forza muscolare dell'uomo,

Leonardo concepisce l'impiego delle molle alla locomozione, ed è perciò il primo, almeno per quanto è noto, che progetta di applicare una fonte di energia che ha origine e si esplica sul veicolo stesso.

Di questo carro automotore, disegnato nel foglio 296 Va. del Cod. Atl., Leonardo se illustra qualche meccanismo non sviluppa, purtroppo, il resto del veicolo che è appena abbozzato. Nella parte superiore della tavola egli ha evidentemente voluto progettare solamente la parte della trasmissione, mentre nella parte inferiore ha sviluppato il congegno motore a molla, ed alcuni particolari per la carica delle molle stesse.

Nel primo disegno, il carro — veduto prospetticamente — appare costituito da un robusto quadro superiore, rafforzato nella parte racchiudente il meccanismo di trasmissione da un secondo quadro inferiore che, con il primo forma una solidissima ed indeformabile struttura a traliccio, resa necessaria dal complesso delle ruote e delle molle che deve sostenere. Questo complesso comprende:

1°) due ruote dentate orizzontali, ingrananti fra loro, sul di cui asse verticale, inferiormente, è montato un pignone a lanterna che a sua volta, ingranato con la corona di piuoli della ruota del carro, le trasmette il moto. Una serie di tiranti e di saette completa il collegamento del sistema e dell'assale con il telaio;

2°) due molle a balestra, ancorate alla traversa centrale del carro (una sola è disegnata, l'altra è accennata) che sembrano collegate a mezzo di una fune al mozzo o tamburo di ciascuna delle due ruote dentate orizzontali.

Sempre riferendoci al disegno della parte superiore della tavola, notiamo poi che c'è una terza ruota, più piccola della ruota con corona di piuoli, che appare spostata verso la parte centrale del carro, ed infine uno sterzo rudimentale, formato da un timone fissato entro un anello ancorato sul lungherone e terminante con una ruota evidentemente manovrabile e destinata alla direzione del veicolo.

Se consideriamo per ora, questo solo disegno del carro automotore disegnato da Leonardo, possiamo subito fare una serie di interessanti osservazioni. In primo luogo non può sicuramente affermarsi che si tratti di un carro a quattro ruote: nel disegno, infatti, oltre alle due ruote che ingranano con le ruote a lanterna di cui una è in vista e l'altra si deve presumere esista sotto la seconda ruota dentata orizzontale, ce n'è una terza appena accennata. Non può pertanto escludersi che un carro a tre ruote e non a quattro, volesse progettare Leonardo, tanto più se consideriamo il sistema di sterzo da lui adottato e, sommariamente, ma chiaramente schizzato.

E non sorprenderà che egli adottasse un siffatto

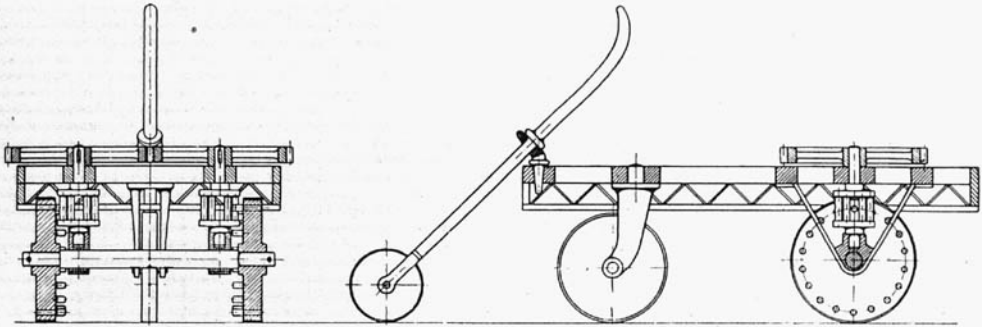


Fig. 49. - Disegno costruttivo del carro automotore di Leonardo.

sistema di guida, se ci riportiamo ai ripetuti riferimenti che, in altre tavole, egli fa ai navigli ed alla navigazione, confrontando i due diversi mezzi di locomozione. E carri e barche egli disegna ed avvicina appunto nei fogli 2 v. e 9 r. del Ms. 2037 dell' Institut de France, ispirandosi, per le sue applicazioni ai veicoli, alle manovre e pratiche marinare.

Questo sterzo del carro automotore non è infatti che un timone vero e proprio, in tutto simile a quello delle navi. Ora è dubbio che siffatto sistema sia efficace nel caso del carro a 4 ruote, mentre lo è nel caso di un carro a tre ruote. E non è da escludersi, a nostro avviso, che Leonardo, limitandosi ad accennare la terza ruota sotto il telaio, non intendesse di abolirla senz'altro, pensando di assegnare alla stessa ruota direttrice del timone, anche il ruolo di ruota portante posteriore.

E' infatti naturale che essendosi ispirato per questo suo sistema di guida ai navigli, egli ponesse il timone non anteriormente al carro, ma posteriormente, anche per ragioni di evidente praticità di funzionamento e, come vedremo più avanti, di manovra. In ogni caso, anche se di un carro a 4 ruote dovesse trattarsi, la carreggiata posteriore, ossia la distanza delle due ruote dalla parte del timone, è inferiore a quella delle due ruote anteriori motrici.

Una seconda considerazione si riferisce al siste-

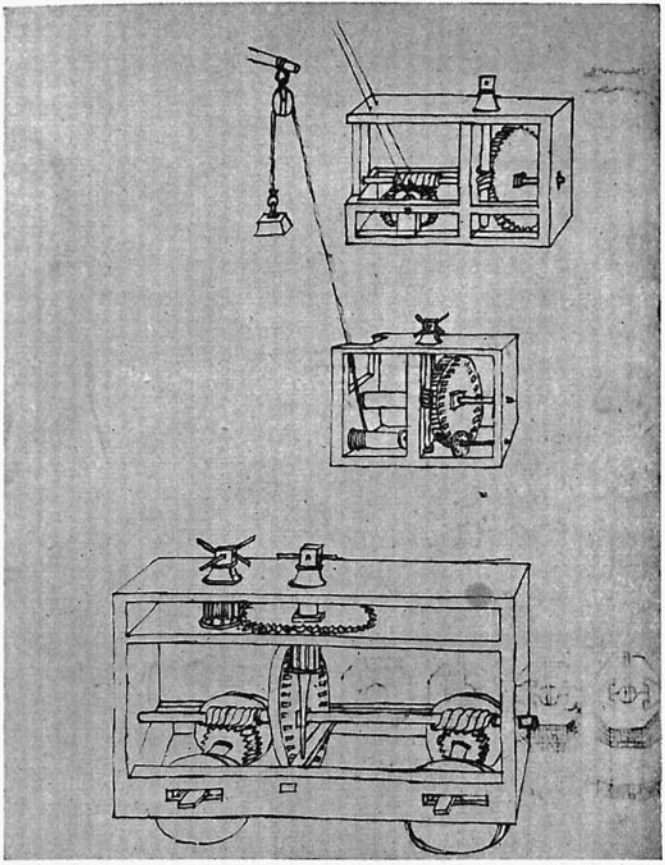


Fig · 50. - Carrello meccanico disegnato da Jacopo Mariano.

ma di trasmissione alle ruote motrici anteriori e cioè al gruppo pignone a lanterna-ruota con corona di piuoli. Leonardo ha disegnato il pignone a lanterna esternamente, e cioè ingranante la ruota a piuoli sul fianco destro, considerando che la parte anteriore del carro è quella delle due ruote dentate orizzontali.

Ora, osservando attentamente il disegno, si può subito rilevare che i denti della corona di piuoli non sono volti all'esterno, ma all'interno, e che le saette o gambe di forza che si dipartono dalla estremità del pignone, non possono evidentemente essere che tra le ruote del carro, per quanto appaiano disegnate in primo piano. Ne consegue subito che i due pignoni a lanterna, i cui assi sono sul prolungamento degli assi verticali delle ruote dentate, debbono essere interni alle ruote, anche per una ragione costruttiva che conferma senz'altro questa nostra deduzione. Infatti qualora si costruissero i pignoni a lanterna esterni alle ruote del carro, la distanza di queste ultime, e cioè la carreggiata del veicolo, verrebbe ridotta a 30 od al massimo a 40 cm., assolutamente inammissibile per evidenti ragioni di stabilità.

Questa trasposizione di piani, nei disegni meccanici di Leonardo, non è del resto isolata e ne vedemmo già un esempio nel caso della trasmissione della testuggine. (Fig. 49).

Fatte queste considerazioni, che ci portano a

conclusioni piuttosto discordanti da quelle degli autori che si sono già occupati di questo veicolo leonardesco, passiamo ora all'esame del secondo gruppo di disegni riferentesi al carro automotore.

Il più importante è quello che rappresenta il carro visto dall'alto. Esso ripete, nella parte anteriore del carro (la inferiore del disegno) il sistema delle due grandi ruote dentate orizzontali che ingranano fra loro in modo che, girando in senso opposto trasmettono ai pignoni a lanterna, montati sul prolungamento dei loro assi verticali, moto contrario (destrorso l'uno, sinistrorso l'altro) e quindi lo stesso senso di rotazione alle due ruote anteriori e motrici del carro. (Fig. 48).

In questo suo carro automotore Leonardo riprende la trasmissione più razionale, con rapporto ridotto, adottando il pignone a lanterna come conduttore e la ruota a piuoli come condotta, e si può ritenere, stando al disegno, che il rapporto di trasmissione sia di 1 : 2, avendo la lanterna 8 o 10 denti e la corona a piuoli della ruota del carro 18 o 20 denti. In tal caso, se supponiamo che la ruota del carro abbia un diametro di 60 cm. e che il rocchetto conduttore possa farsi ruotare al ritmo di un giro ogni due secondi, ne deriva che il carro potrà avanzare alla media oraria di 1693 metri all'ora. Velocità modesta, ma comunque apprezzabile, tanto più se, come è probabile, realizzata su un veicolo destinato ad

usi bellici, nel quale era già un gran vantaggio avere eliminato i cavalli.

Costruttivamente è del massimo interesse rilevare che in questo veicolo Leonardo non solamente ha adottato una trasmissione con rapporto di riduzione, riducendo quindi lo sforzo applicato alla ruota conduttrice, ma ha anche realizzato la trasmissione indipendentemente ai due pignoni a lanterna, ideando un meccanismo che, mentre trasmette il moto alle due ruote, le rende indipendenti una dall'altra, e cioè un « differenziale ». Sarebbe anzi più esatto dire che si tratta, in determinate condizioni di funzionamento, di un ruotismo epiciclico, e poichè appunto dai ruotismi epicicloidali deriva l'attuale differenziale applicato agli autoveicoli, resta il fatto che in questo suo veicolo Leonardo ha impostato, e praticamente risolto il problema di permettere a due ruote solidali di un carro di percorrere le curve, rotolando normalmente e senza strisciamenti, che solamente nel 1836 veniva ripreso, applicato e perfezionato dal francese Pecqueur.

L'altra parte, non meno interessante di questo disegno, è costituita dal sistema delle molle, ossia dal complesso che fornisce, o dovrebbe fornire l'energia motrice a questo veicolo. Questa parte è purtroppo la meno chiara del disegno. Alla robusta traversa centrale del quadro del telaio, sono fissate, ai punti di

incontro della traversa con i due lungheroni, due grosse molle a balestra con contro-molla. Dal ricciolo di ciascuna di queste molle, si diparte una dentiera, ingranata ad un rocchetto interno al ricciolo stesso, i cui particolari si vedono disegnati nella parte superiore, ed in basso a sinistra, che a mezzo di una fune si aggancia al braccio di una specie di tenaglia, avente il fulcro a metà della traversa principale del carro.

Le due leve di questa tenaglia, che a nostro avviso non è costituita da elementi elastici, ma da due bracci rigidi, sembrano dover poggiare su due staffe piazzate su due altre molle, con contromolla, ancorate all'altezza del punto di incontro delle due ruote dentate, e terminanti con la estremità libera fra i denti di due rocchetti a sei denti.

A parte il particolare disegnato in basso, che sembra illustrare il sistema di carica delle due grandi molle superiori, a mezzo di una manovella e della dentiera, nessun altro cenno si trova nel disegno che stia ad indicare quale collegamento esista tra il sistema di molle e le ruote dentate, fatta eccezione per l'accenno ad una fune, che pare destinata ad avvolgersi al tamburo di una delle ruote, appena schizzato nel disegno prospettico ch'è nella parte superiore della tavola.

Sul funzionamento di questo complesso di molle e di meccanismi, molte ipotesi possono farsi, e pa-

recchie se ne sono fatte; noi siamo però del parere che in questo come in altri casi, nella interpretazione dei disegni leonardeschi, sia da consigliarsi la massima prudenza, e convenga attenersi all'evidenza grafica, per non correre il rischio di attribuire al nostro inventore soluzioni e concezioni arbitrarie. Chè, fra l'altro, deve pure ammettersi che anche Leonardo, in molti casi, abbia, nei suoi progetti, incontrato difficoltà non risolubili in pratica, ed in altri abbia semplicemente abbozzato delle idee senza poi svolgerle compiutamente.

Nel caso di questo carro automotore, è evidente che Leonardo s'è proposto il problema di sviluppare sullo stesso veicolo la energia necessaria a metterlo in moto, o per lo meno, una parte di questa energia, che venisse ad integrare quella muscolare; è però altrettanto evidente, almeno stando al disegno, che non ha potuto trovare la soluzione pratica per trasmettere l'energia delle molle alle ruote. Altrettanto incerto appare anche il funzionamento delle due grandi molle, che così com'è nel disegno, richiederebbe un freno od un sistema a scatto, per evitare la scarica rapida delle balestre, sistema che potrebbe essere costituito dai due rocchetti a sei denti, posti lateralmente, ed agenti a mezzo delle due molle inferiori sulle braccia della tenaglia.

Osservando attentamente il particolare della den-

tiera-rocchetto, contenuta nel ricciolo della molla, disegnato nel basso a sinistra della tavola, sembra potervi scorgere un sistema di ritenuta del rocchetto dentato, comandato dalla manovella e da un piccolo rocchetto a denti supplementare, il quale avrebbe la funzione di impedire la scarica immediata della molla, che altrimenti avverrebbe; ma il disegno non è abbastanza chiaro per poterlo senz'altro affermare, ed è probabile che Leonardo a questo complesso dentiera-rocchetto assegnasse semplicemente il compito di permettere ai manovratori la facile e continua carica delle molle.

Si deve quindi presumere che, avendo egli disegnato il sistema di carica delle molle a mezzo di due manovelle azionanti il sistema rocchetto-dentiera del ricciolo, così com'è accennato nei due particolari del disegno, necessariamente sul carro dovessero trovarsi almeno due manovratori, che avevano il compito di mantenere continuamente cariche le molle.

Ammesso, grosso modo, che queste grosse molle di 20 o 30 chili l'una, stando ad un apprezzamento approssimato delle loro dimensioni, potessero immagazzinare 60 o 70 kgm. per kg., dato il rendimento necessariamente basso delle trasmissioni, questo veicolo non potrebbe percorrere sotto l'azione di esse, che poco più di 200 metri, dato che pesi attorno ai 500 kg. complessivamente, e che la distensione delle

molle possa regolarsi opportunamente (1).

Un tal risultato rappresenterebbe pur sempre un gran passo, ma non è probabile che in questo suo carro automotore Leonardo potesse raggiungerlo, dati i mezzi ed i materiali di cui disponeva. A parte questo, comunque è nostro parere che egli non abbia potuto realizzare questo suo veicolo appunto per le difficoltà incontrate nella trasmissione della energia delle molle, difficoltà che si palesa anche nei due disegni di questa tavola del Cod. Atlantico, i quali rivelano il travaglio del progettista.

Nel disegno in alto Leonardo ha infatti abbozzato un primo sistema di trasmissione a fune, avvolgentesi sul tamburo di ciascuna ruota, in quello inferiore che è sostanzialmente diverso, non solo studia e disegna i particolari di un altro sistema, ma progetta

---

(1) Per orientare in questo calcolo rapido, aggiungeremo che siamo partiti dalla formula che dà il lavoro di deformazione elastica immagazzinato dalla molla:

$$L = \frac{1}{18\,E} \cdot \frac{Kf^2}{E} \cdot V \text{ (Hütte)}$$

dove Kf è il carico di sicurezza a flessione; E il modulo di elasticità, V il volume della molla, proporzionale al peso; ed abbiamo calcolato lo sforzo di trazione in base alla: $W = w\,P$ che dà la resistenza totale di trazione, nella quale P è il peso del veicolo e w è il coefficiente di resistenza alla trazione, assunto eguale a 0,04 (Morin).

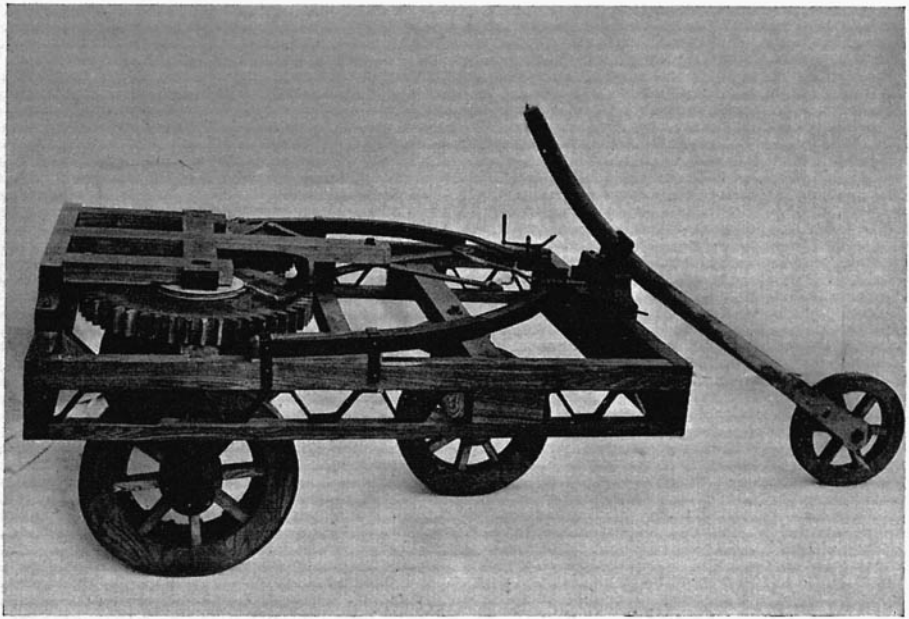


Fig. 51. - Il carro automotore di Leonardo.
Modello ricostruito per la Mostra di Leonardo.

un complesso sistema di molle, e pare svolgere un'altra idea: dispone diversamente le grandi molle ad S, vi aggiunge la tenaglia centrale, e le molle sulle ruote dentate ed infine i due piccoli rocchetti a sei denti, la cui funzione non appare chiara.

La disposizione di questi elementi permette di presumere che Leonardo si preoccupasse di progettare un dispositivo che impedisse la scarica immediata e violenta delle grandi molle e che, d'altra parte, concorresse a frenarle convenientemente, alleggerendo in tal modo il compito dei manovratori.

E questo potrebbe ottenersi se — ruotando i due rocchetti — i due elementi elastici disegnati sulle grandi ruote dentate agissero da freni, a mezzo dei risalti essi pure disegnati, sulle braccia della tenaglia. Ma non si vede come — una volta disimpegnati dai denti del rocchetto — quelli che abbiam chiamato freni, possano ritornare alle loro posizioni primitive e, comunque, bisognerebbe sensibilmente modificare le sagome e le dimensioni dei diversi elementi, per ottenere dei risultati apprezzabili, come può facilmente desumersi dai tre disegni schematici nei quali abbiam cercato di ricostruire le tre fasi principali del funzionamento di questo complesso.

Nel primo le grandi molle a balestra (a-b) sono cariche; le braccia della tenaglia (c) sono divaricate, le funi che avvolgono i tamburi (e) in tensione e

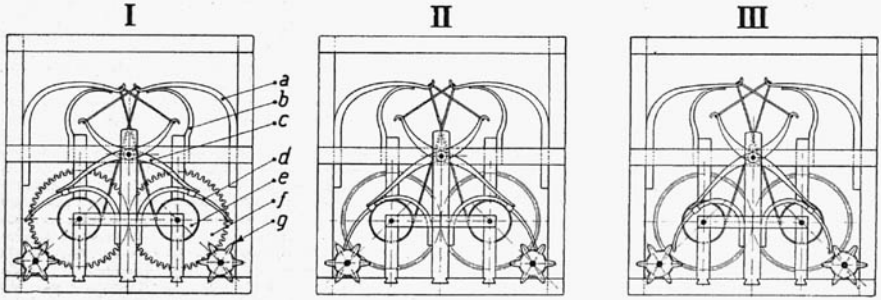


Fig. 52. - Disegni schematici per lo studio del sistema di molle del carro automotore.

pronte a svolgersi per mettere in moto le due ruote dentate (f), e quindi il carro; i freni (d) sono liberi dai denti dei rocchetti (g) ed in contatto con le braccia della tenaglia. (Fig. 52).

Nel secondo la distensione delle (a-b), oltre a svolgere le funi dei tamburi, costringe le braccia della tenaglia a stringersi abbassando le estremità dei freni (d) che vanno ad impegnarsi tra i denti dei rocchetti (g).

Nel terzo le molle (a-b) sono quasi completamente distese per tutta la loro corsa ed i freni (d) stanno per disimpegnarsi e per entrare in azione, onde facilitare la azione dei manovratori.

Questi schemi che ci hanno servito di base per la ricostruzione del carro, che abbiamo eseguita, confermano, con le ipotesi che abbiamo avanzato, la convinzione che questo veicolo così come è stato disegnato non può aver funzionato.

Resta comunque il fatto che Leonardo ha, in questo foglio, per primo disegnato un sistema di ruotismo differenziale, applicato ad un veicolo; ha concepito l'idea di accumulare attraverso un sistema di molle, l'energia necessaria al moto, sullo stesso veicolo; ha infine applicato la trasmissione indipendente alle due ruote motrici.

Tutti gli ingegnosi veicoli ideati da Leonardo, tutte le numerose applicazioni costruttive da lui escogi-

tate e disegnate, più o meno compiutamente e chiaramente, provano che il problema dei trasporti pesanti e dei carri da combattimento è stato fra quelli che ripetutamente ha occupato la sua mente.

La grande varietà dei veicoli da lui progettata, e che troviamo nei diversi codici, dimostra anche che di questo problema egli non s'è solamente occupato negli anni giovanili e del così detto periodo milanese-sforzesco, ma anche durante gli anni della sua vita errabonda (1500-1516).

Alla mente che aveva concepito con il volo umano la conquista del terzo elemento, non potevano apparire meno attraenti i problemi dei trasporti terrestri; e certo Leonardo come aveva pensato di svincolare l'uomo dal suo elemento naturale col suo « strumento oprante per legge matematica », ha intravisto la possibilità di costruire « strumenti » e carri « di facile movimento » nei quali si potessero agevolmente trasportare dei pesi senza ricorrere alla forza dei cavalli. E non potendo disporre che di fonti di energia limitata si è applicato alla riduzione delle resistenze passive, specie nei veicoli, affrontando per primo il vasto campo di investigazione che offrono i problemi dell'attrito e della trazione.

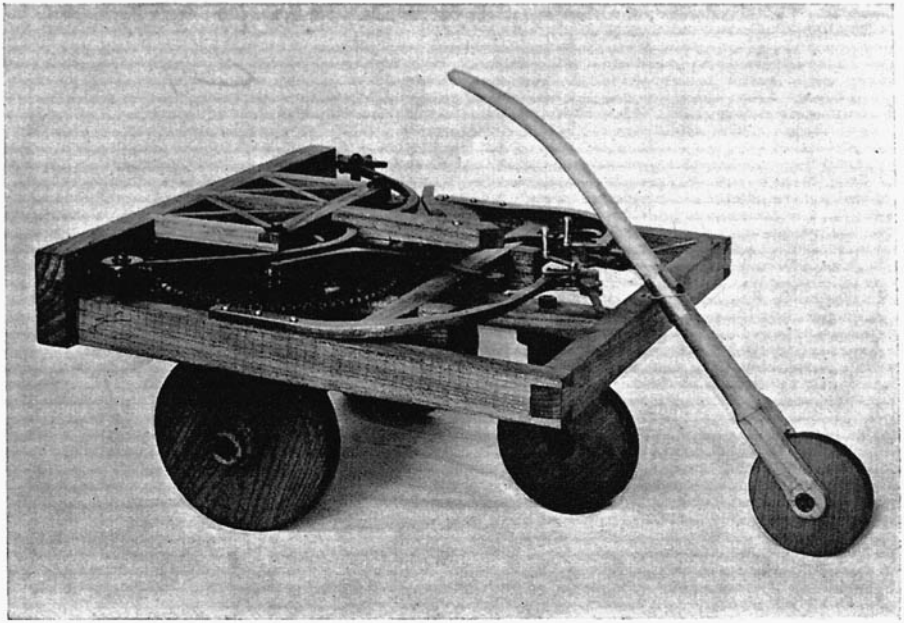


Fig. 53. - Altro modello in scala ridotta del carro automotore.

III°

ATTRITO E TRAZIONE

Gli studi e le esperienze di Leonardo sulla trazione e sull'attrito, costituiscono, a nostro avviso, una delle parti più originali, più organiche e complete della meccanica vinciana.

Leonardo infatti non è soltanto il primo che considera l'attrito e che sistematicamente lo studia attraverso una lunga serie di esperienze che, a volta a volta, lo portano alla definizione di leggi od alla enunciazione di osservazioni, ma, quel che più conta, è il primo che nella costruzione delle sue macchine e dei suoi veicoli, tiene conto del valore dell'attrito e ne valuta l'influenza sul meccanismo.

Anche se, dati i mezzi primitivi di cui disponeva, Leonardo non ha potuto stabilire che valori approssimativi del coefficiente di attrito — che in generale e, probabilmente per uniformità di calcolo, assume eguale ad 1/4 — egli ha peraltro, con acutissima intuizione, riconosciuto ed affermato le diverse specie

ed i diversi caratteri dell'attrito ed in taluni casi precorso le moderne conoscenze in materia, andando oltre alle conclusioni di Amontons (1699), Muschembroek (1729), Coulomb (1871).

A questi risultati è giunto non casualmente o per felice improvvisazione, ma attraverso ricerche ed esperienze sistematiche, seguendo quella norma che è fondamentale nella scienza moderna e che, a varie riprese, nei suoi scritti, espone: « e questa sperienza si faccia più volte, acciò che qualche accidente non impedissi o falsassi tal prova, che la sperienza fussi falsa, e ch'ella inganassi o no il suo speculatore ». (Ms. M. 57 r), perchè « nissuna umana investigazione si pò dimandare vera scienzia, s'essa non passa per le matematiche dimostrazioni, e se tu dirai, che le scienzie, che principiano e finiscono nella mente, abbiano verità, questo non si concede, ma si niega, per molte raggioni, e prima, che in tali discorsi mentali non accade esperienzia, senza la quale nulla dà di sé certezza ». (Cod. Urbinate I), e ancora perchè: « nessuna certezza è dove non si può applicare una delle scienzie matematiche, over che non sono unite con esse matematiche ». (Ms. G. 96 v).

È su questi concetti che Leonardo fonda la sua meccanica, ossia la sua « scienzia strumentale over machinale », che Plutarco giudicava ignobile e sordida per i suoi fini utilitari e che con lui diventa

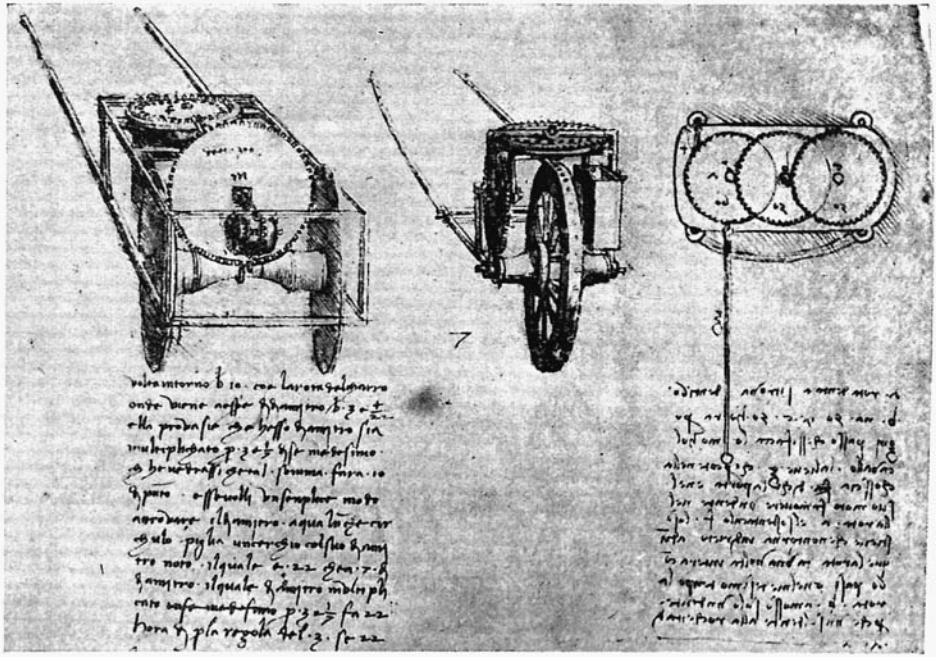


Fig. 54. - Contamiglia e contapassi disegnati da Leonardo. (Cod. Atl. I R-ab)

« nobilissima e sopra tutte l'altre utilissima, conciosiachè mediante quella tutti li corpi animati che hanno moto fanno tutte le loro operazioni ».

Affermando che « la gravità, la forza insieme co' la percussione » sono le « generatrici del moto perchè esso senza queste creare non si pò. Ma ciascuna delle dette potenzie non pò in pari moto generare potenzia simile a sè » (Cod. Arundel 37 v.), Leonardo chiaramente enuncia quello che è il principio fondamentale di qualsiasi macchina e cioè che essa non può rendere una quantità di energia maggiore di quella che le è fornita, per l'esistenza dell'attrito che converte una parte dell'energia in una forma meno utilizzabile. E che questo concetto della reale ed effettiva funzione della macchina sia in lui ben chiaro lo si può definitivamente arguire dal passo seguente del Codice Atlantico (23 V.), nel quale egli esplicitamente rileva ed identifica le cause di errore della meccanica antica che, attenendosi a criteri ed a presupposti puramente teorici ed astratti, non teneva conto delle resistenze passive.

Scrive egli infatti: « La scienza dei pesi è ingannata dalla sua pratica, e, in molte parte, essa (pratica) non s'accorda con essa scienza; nè è possibile accordarla; e questo nasce dalli poli delle bilancie, mediante li quali di tali pesi si fa scienza, li quali poli, appresso li antichi filosofi, furo li poli posti di

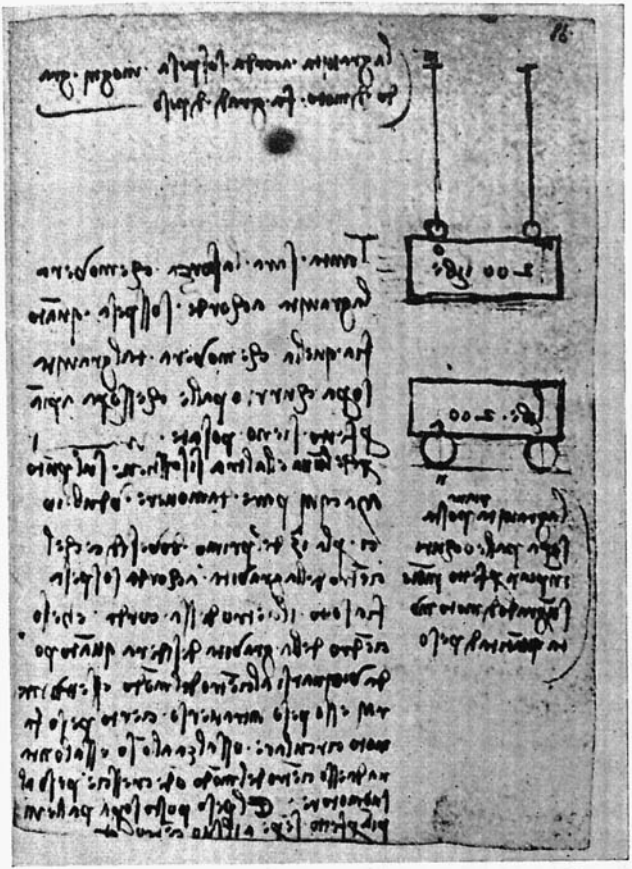


Fig. 55. - Esperimenti sull'attrito di rotolamento. (Cod. Forster II 86 r.)

natura di linia matematica, e in alcun loco in punti matematici, li quali punti e linie sono incorporei: e la pratica li pone corporei, perchè così comanda necessità, volendo sostenere il peso d'esse bilancie, insieme colli pesi (che) sopra di lor si giudicano. Ho trovato essi antichi essersi ingannati in esso giudizio dei pesi, e questo inganno è nato perchè in gran parte della loro scienza, hanno usato poli corporei, e in gran parte poli matematici, cioè mentali over incorporei ». (Cod. A. 23 v.).

Passo che trova la sua conseguente ed attualissima conclusione nella affermazione « a ciascun strumento si richiede essere fatto colla sperienza ». (Richter, 1156).

Se le manifestazioni esterne della resistenza di attrito erano note all'uomo preistorico, il quale già nel suo trapano a fuoco, che può ritenersi la prima macchina costruita, ne ha appunto — incosciamente — tratto partito per produrre calore e fuoco; se praticamente in talune applicazioni — quali quella dei rulli per i trasporti di grossi pesi o addirittura di sfere rotanti — come nel caso della piattaforma della nave di Nemi, gli antichi ingegneri ovviarono in parte agli effetti di questa resistenza passiva, non pare peraltro che prima di Leonardo le origini, la natura, e il valore di questa resistenza fossero noti, ed è comunque a lui che si debbono attribuire le prime esperienze

sistematiche e le prime investigazioni, condotte con criterio scientifico, sull'attrito.

Come abbiamo già avuto occasione di rilevare, le citazioni, le osservazioni, i calcoli riferentisi alla resistenza d'attrito, ai suoi valori, alla sua influenza sulle macchine e sul loro equilibrio, si trovano sparsi nel Codice Atlantico, nei Codicetti Forster, nel Codice Arundel, nei manoscritti dell'Institut de France.

Stando alla cronologia assegnata a questi codici, Leonardo si sarebbe dunque occupato del problema che ci interessa nel periodo che va dal 1487 al 1505 ed oltre. E questo è tutto; non è possibile infatti stabilire una successione cronologica di questi suoi studi attraverso le notazioni fatte ovunque nei codici e, senza alcun criterio ordinativo, disposte.

Nella esposizione e nella citazione dei brani vinciani che si riferiscono particolarmente all'attrito, noi abbiamo pertanto cercato di seguire un ordine logico senza preoccuparci delle date assegnate ai diversi Codici, le quali, ripetiamo, non sono che in parte attendibili.

Secondo le stesse notazioni vinciane, che sono frequenti, pare non possa esistere dubbio che Leonardo, allo studio ed alla determinazione delle resistenze di attrito ed alla trazione, sia stato naturalmente avviato dalla ricerca delle soluzioni di quei problemi che erano per lui fondamentali e più fre-

quenti e che appunto si riferivano e al sollevamento e al trasporto di grandi pesi.

Sono questi, del resto, i problemi che hanno maggiormente occupato, insieme a quello del sollevamento dell'acqua, la mente degli antichi ingegneri.

Quando nel Cod. Arundel (151 r.) egli scrive « essa forza è infinita, perchè con essa infiniti mondi si moverebbe, se strumenti far si potessi dove essa forza generare si potessi », non solo manifesta quello che è l'ideale di ogni scienziato, poter cioè disporre delle immense forze della natura, ma implicitamente esprime il tormento del meccanico, del costruttore di macchine, che non dispone che di deboli e limitate fonti di energia.

Con la lucidità ch'è propria del suo genio, Leonardo, queste deboli e limitate fonti energetiche ha tentato di sfruttare nel modo migliore « nei suoi strumenti », affrontando il problema della riduzione delle resistenze passive, e seguendo cioè un criterio ch'è proprio della scienza meccanica moderna. E queste resistenze passive ha cercato di studiare, di distinguere, di determinare, attraverso sistematiche ricerche sperimentali.

Comincia così ad osservare che: « la confregazione di qualunque corpo variamente laterato sempre fia equale resistenza, e sia fatto sopra qual lato si voglia, pur che non si fichi sul piano ove si confrega ».

(Cod. Atl. 209 V-a), rilevando cioè che l'attrito di un corpo su un piano è sempre eguale, qualunque sia il lato d'appoggio del corpo su questo piano o superficie — sempre che il corpo non vi venga comunque premuto — ed affermando quindi che l'attrito dipende dalla natura del corpo considerato, la quale non varia nel medesimo corpo.

La quale osservazione conferma annotando, al foglio 41 r del Codice Arundel: « le confregazioni dei pesi son di tante varie resistenze quanto son vari i corpi che insieme si confregano; e se le superfitie de' corpi che insieme si confregano saranno dense e di resistentia planizia, allora il contatto fia d'equal resistentia a quel picolo ».

Qui Leonardo stabilisce esattamente che l'attrito dipende dalla natura dei materiali a contatto, precedendo le conclusioni del Coulomb (1781) e del Morin (1831), affermando nella seconda parte che la resistenza d'attrito è indipendente dalla estensione delle superfici di contatto. Questa affermazione è pure praticamente corretta, ed indipendente si considera infatti l'attrito di strisciamento dalla estensione delle superfici di contatto, quando la pressione non superi il valore di 0,5 Kg. per mm^2.

Due secoli dopo di lui, in base alle sue esperienze, anche Amontons era arrivato a riconoscere che la estensione delle superfici di contatto non influiva sul-

l'attrito, ma Muschembroek (1729) successivamente aveva rilevato che esso dipendeva oltre che dalle pressioni, anche dalla estensione delle superfici di contatto e l'abate Bossut e il Coulomb in questo senso riassumevano le loro esperienze. Per essere più esatti, il Coulomb affermava bensì l'influenza della estensione delle superfici di contatto nel caso dei corpi in moto, o di superfici spalmate di uno strato lubrificante (enduit), ma riconosceva « che la grandezza della superficie non influisce che in maniera insensibile » sull'attrito, quando i corpi che strisciano l'uno sull'altro sono all'inizio del moto.

Con i mezzi sperimentali primitivi di cui disponeva, Leonardo era pertanto giunto alla definizione di una legge, riconosciuta successivamente — entro certi limiti — esatta ed ancor oggi applicata. Così come all'altra che, da Amontons in poi, i diversi sperimentatori confermarono e cioè che la resistenza dell'attrito è proporzionale alla così detta forza normale che preme un corpo contro l'altro, e che Leonardo enuncia con lapidaria concisione al foglio 72 r. del terzo dei Codicetti Forster: « La confregazione si fa di duplicata fatica in duplicato peso ».

Può sembrare che egli questa legge contraddica quando scrive :« la difficultà che dà la confregazione pel moto de' pesi, è sseparata e rremota da esso peso » (Codice Forster II, 2 - 85 v.), ma in realtà in

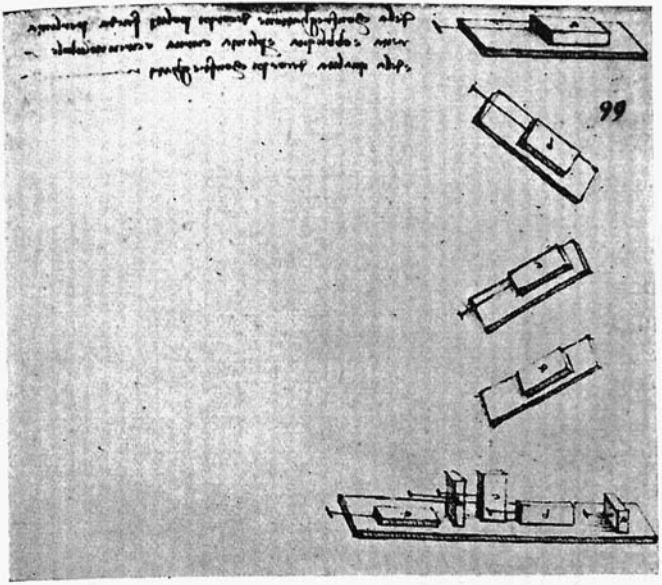


Fig. 56. - Studi sull'attrito strisciante. (Cod. Atl. 198 R.a)

questo caso egli intende parlare dell'attrito considerando — a parità di peso — come esso vari col variare della natura delle superfici di contatto, ossia del loro grado di asperità e di lavorazione. E subito dopo infatti — allo stesso foglio — ne dà la spiegazione scrivendo: « Ragione. Questo si dimostra per l' antidette cose, cioè che chiaro si vede che 'l moto facto dei pesi per linea equidiacente,

non dà di sè altra difficultà al suo motore che la propria sua confregazione che ffa col piano dove si toca con eso; il qual moto fia tanto più difficile quanto il piano fia più ruvido e asspro. E che sia vero, movila, com'è decto, sopra palle in pian perfetto: vederai che ssanza fatica si moverà ».

Comunque, a dissipare ogni dubbio sulla interpretazione di questo passo che potrebbe indurre a pensare che Leonardo non avesse idee abbastanza chiare, basterà quello che egli scrive al foglio 72 V-b del Codice Atlantico: « infralli corpi d'equal lubricità il più grave à più potente resistenzia nella sua confregazione » e cioè: tra corpi di egual scorrevolezza il più pesante offre maggiore resistenza; enunciato che conferma chiaramente la legge sulla influenza che la pressione, che si esercita tra le due superfici a contatto, ha sull'attrito.

Ma nella sopra citata annotazione del Cod. Forster (II, 2-85 v.) v'è l'altra affermazione importante che si riferisce al grado di lavorazione delle superfici: (« il qual moto fia tanto più difficile quanto il piano fia più rivido e asspro »), ed alla interposizione di « palle » fra le superfici di contatto.

Leonardo ha nettamente anche in questo caso riconosciuto l'influenza dello stato di levigatezza dei corpi sulla resistenza di attrito, notando: « quelli corpi che son di più pulita superfizie ànno più facile

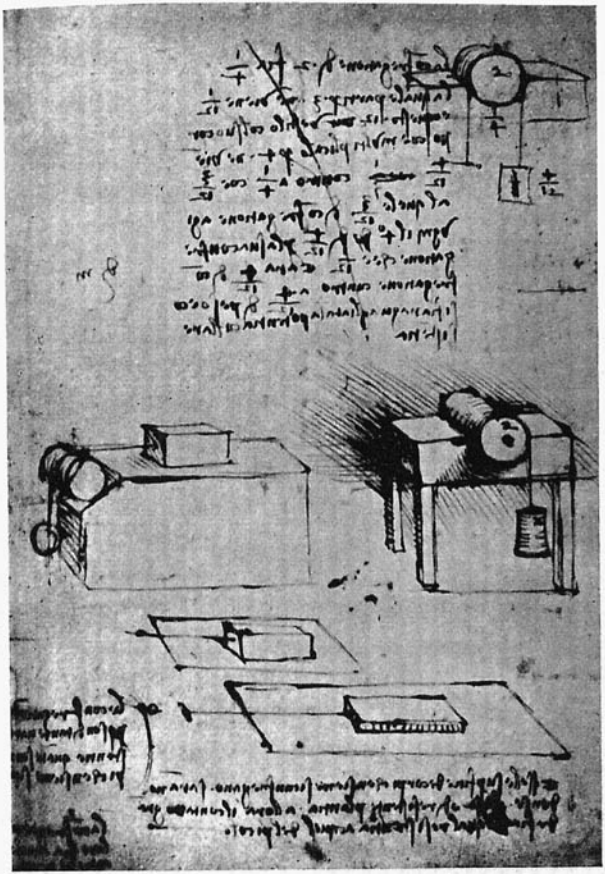


Fig. 57. - Banco per esperienze sull'attrito. (Cod. Arundel 41 r.)

confregazione » (Cod. Atl. 72 V-b) e, nel Cod. Forster II, 2-87 r.: « ... bisognia sapere la natura del contatto che esso peso ha col piano dove si confrega per lo suo moto, perchè vari corpi hanno varie confregazioni; conciosiachè se saranno corpi di varie superfizie, cioè l'una delicata e pulita e bene unta o insaponata, e ssia mossa sopra un piano di simile natura, essa sarà molto più facile al movimento che quella che sarà ruvida a uso di lima o di rasspa ».

E gli effetti dell'attrito sulle superfici a contatto ha particolarmente osservato nel caso delle punte del compasso, nel seguente brano del Cod. Forster II, 2-133 r., caratteristico per la sua impostazione: « Quella cosa che ttutta si consuma per lo lungo moto della sua confregazione, consumerà la sua parte nel principio di tal moto. Questo ci dimostra non si potere dare o ffare cosa d'alcuna perfetta osservazione, imperochè se ttu vorai fare il perfetto circulo per lo moto dell'una delle punte de sessto e che ttu confessi over confermi quello che di sopra si propone, cioè che per lungo moto tale punta s'abbia a consummare, egli è neciesario conciedere che sse 'l tutto si consuma con tutto un cierto tenpo, che ancora la parte nella parte d'esso tenpo s'abbia a consumare, e che lla indivisibile nello indivisibile tenpo dia principio a ttale consumazione.

« E così la oposita punta d'esso sessto, la quale

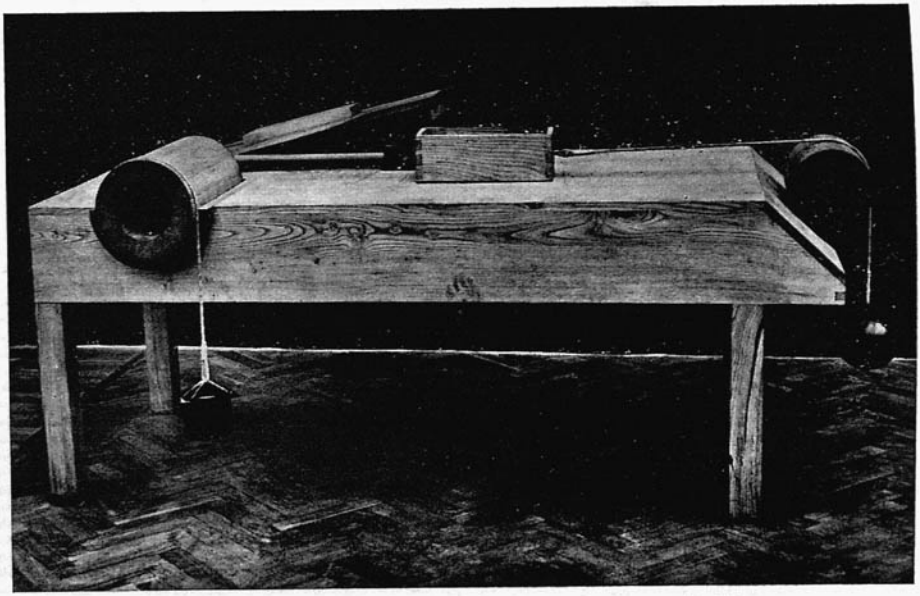


Fig. 58. - Ricostruzione del banco per le esperienze sull'attrito secondo i disegni di Leonardo.

si volta in se medesimo sopra il cientro di tale circulo, in ogni grado di moto acquista consumazione di sè e del sito che lla sostiene; onde direno che 'l fine circulo non si congiugnie col suo principio, anzi il termine di tale linia s'avicina qualche parte insensibile verso il cientro di tale circulo ».

Fin qui dunque sulla scorta delle annotazioni vinciane — sparse nei diversi codici citati — si può senz'altro affermare che Leonardo non s'è solo limitato ad osservare ed a riconoscere l'esistenza dell'attrito, ma ne ha dettato quelle stesse leggi che le esperienze dei successori han confermato, e che ancor oggi noi consideriamo alla base del calcolo della resistenza dell'attrito radente e di strisciamento.

Questa resistenza — noi, come Leonardo — riteniamo infatti:

1°) dipendente dalla natura dei materiali a contatto;
2°) indipendente dalla estensione delle superfici di contatto entro certi limiti della pressione;
3°) proporzionale alla pressione;
4°) dipendente dal grado di levigatezza o di lavorazione delle superfici a contatto.

E Coulomb nella sua Teoria delle Macchine semplici, parte appunto da queste basi per le sue esperienze sull'attrito, con la differenza che distingue: i corpi a contatto tra di loro da un certo tempo, dai

corpi che invece già possiedono una certa velocità uniforme, che sono cioè già in movimento. Inoltre — come già vedemmo — Coulomb, a differenza di Leonardo, ritiene che la estensione delle superfici di contatto influisca, se pure insensibilmente, in taluni casi, sul valore dell'attrito, così come vi può influire lo stato igrometrico dell'atmosfera. Già De Camus (1722) e Désaguilliers (1751) del resto, lo avevano preceduto nella osservazione che l'attrito di un corpo in moto, è meno considerevole di quello di un corpo che si vuole togliere dallo stato di riposo, senza peraltro arrivare alla determinazione del rapporto che poteva esistere tra queste due specie di attrito.

Ma neppure a Leonardo era sfuggita questa differenza tra l'attrito di distacco — come noi lo chiamiamo — e l'attrito dei corpi in movimento, se ha potuto scrivere: « la confregazione facta da uno medesimo peso sarà d'equal resistenzia nel principio del suo moto ancora che 'l contatto sia di diverse larghezze e llunghezze » (Cod. Forster II-2-132 V.), e successivamente nello stesso foglio: « la grandezza del contatto fatto dai corpi densi nella loro confregazione arà tanto più lunga premanenzia, quant'è ella sarà di maggior somma; e così de converso sarà tanto men durabile, quanto essa fia di minore grandeza ».

Enunciazioni che, a nostro avviso, permettono di

stabilire: che Leonardo ha considerato e rilevato l'attrito di distacco, così come il De Camus e il Dèsaguilliers, senza peraltro apprezzarne il valore, ma comunque, constatando che esso attrito di distacco è indipendente dalle superfici di contatto ed è tanto maggiore quanto maggiore è la pressione che s'esercita su queste superfici. E nello stesso senso, in quest'ultimo caso, si pronuncia il Coulomb.

Non crediamo che possano altrimenti interpretarsi questi due brani vinciani che appartengono allo stesso foglio e per i quali dunque non è ammissibile quella contraddizione che sembra esistere.

Non deve e non può del resto meravigliare che a Leonardo, il quale sulla « confregazione » e sulla trazione ha indubbiamente fatto molte esperienze, sia sfuggito come all'inizio del moto di due corpi a contatto, si richiedeva uno sforzo particolare al distacco, specialmente poi se questi corpi erano a contatto da parecchio tempo. Tanto più, poi, se si considerano le condizioni ed i mezzi delle sue esperienze, che erano limitati e primitivi, per quanto ingegnosissimi, come il sistema per misurare il carico di rottura di un filo, o come lo stesso banco per le prove di attrito, che il Coulomb ha riprodotto, perfezionandone il sistema di misurazione degli sforzi necessari a vincere le resistenze d'attrito.

Comunque, queste sue esperienze lo hanno por-

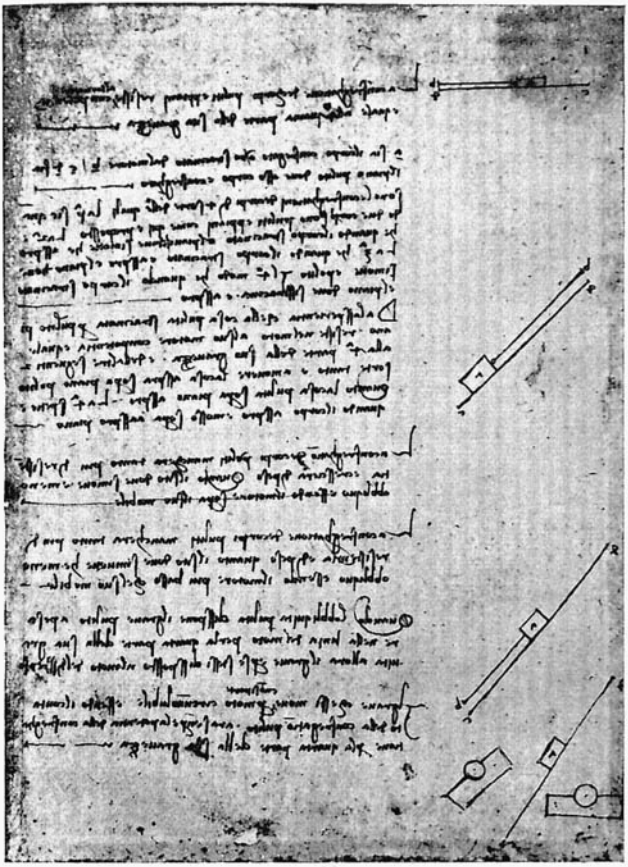


Fig. 59. - Considerazioni sull'attrito strisciante. (Cod. Atl. 198 Va)

tato a risultati che, nelle linee fondamentali, non vennero superati da quelli degli sperimentatori posteriori.

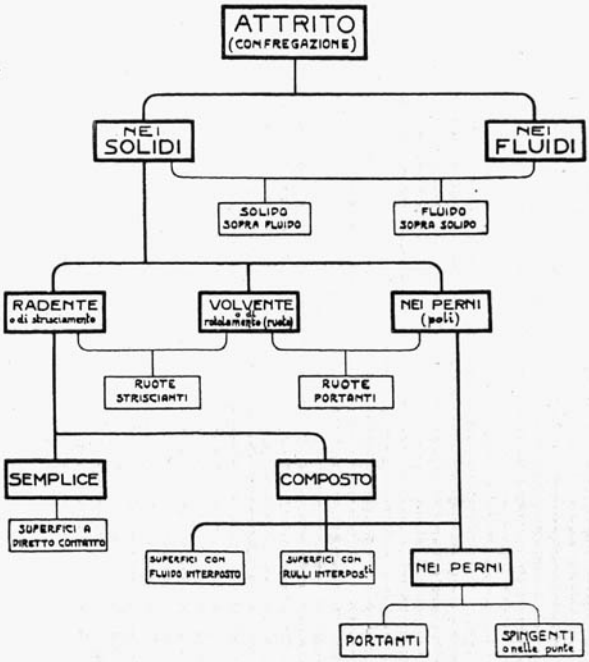
Procedendo nello studio delle sue annotazioni sull'attrito, troviamo infatti ancora che egli non s'è limitato alle già citate osservazioni, che considerano i casi di corpi striscianti uno sull'altro, senza interposizione di strati lubrificanti o scorrevoli, ma ha esteso le sue ricerche a tutti i casi di superfici comunque in contatto. E nel Codicetto Forster I°, rileviamo subito come egli distingua l'attrito. Scrive infatti: « De confregazione. - Il moto confregabile si divide in parti, delle quali la prima è semplice e ttutte l'altre sono conposte. La senplice è quando la cosa è strascinata sopra al senplice piano sanza alcuna inframissione; questa è sol quella che fa il foco quanto sarà potente, cioè genera il foco, come si vede alle rote d'acqua quando si toglie via l'acqua infra 'l fero arotato e essa rota.

« Li altri son conposti e ssi dividano in 2 parti: alla prima è quando alcuna untuosità d'alcuno sottile corpo s'interpone infra i corpi insieme confregati; e lla seconda fia quando altra confregazione infra questa s'inframette, come sarebbe la confregazione delli poli delle rote. La prima ancor si divide in 2 parti, cioè la untuosità che ss'interpone in detta confregazione, 2ª e le palle e ssimili ».

A parte la interessante osservazione contenuta in

NATURA E SPECIE DELL'ATTRITO SECONDO LEONARDO

(Cod. Atlantico - Cod. Forster - Cod. Arundel)



questo brano, che si riferisce alla trasformazione dell'attrito in calore, quando venga a mancare l'acqua che funge da lubrificante e refrigerante nei perni delle ruote, notiamo subito che Leonardo distingue già nettamente l'attrito radente da quello dei poli o perni, e considera l'interposizione tra le superfici a contatto di strati lubrificanti, o di sfere, per diminuire la resistenza al moto.

Ma sempre a proposito della classificazione delle diverse specie di attrito nel foglio 209 del Cod. Atlantico, egli è più preciso e più completo. Scrive infatti: « Sono i modi di confregazione di 3 nature, delle quali l'una è causata per retta (lin) planizia, l'altra per curva, come sono li poli, e la 3ª è fatta in circulo piano come la macina dei mulini; e di queste ne nascie 2 miste e composte, cioè (l'altra) pò essere partecipante della prima e 3ª, l'altra della prima e 2ª. Ecci la confregazione intersegabile, la quale son due corpi lunghi che si movono in croce, e ce n'è un'altra, la quale si move il piano contra al mobile che di sopra se li confrega ».

Nella precedente citazione ha parlato di « moto confregabile » distinguendolo in semplice e composto; in questa del Codice Atlantico, parla della « natura della confregazione », ripete che l'attrito può essere radente o dei perni, ma vi aggiunge anche quello di rotolamento (« fatta in circulo piano come la

macina dei mulini ») e considera altre 4 specie di « confregazione mista e composta », derivante la prima dal moto strisciante e di rotolamento, la seconda dal moto rotante e di strisciamento — che possono identificarsi con i casi di ruote parzialmente slittanti —; una terza tra corpi lunghi « che si movano in croce » che egli chiama di « intersegazione » e che si riduce al caso dell'attrito radente; ed una quarta la quale non contempla che un caso reciproco del primo già considerato, ossia del piano che strisci contro il peso — normalmente mobile — che vi poggia sopra.

Di questa citazione è pertanto da ritenere che Leonardo distingue anche l'attrito di rotolamento, come del resto nello stesso foglio confermerà più avanti, trattando il caso della ruota del carro che « si move sopra la terra ».

Ecco quanto scrive sempre al foglio 209 V-a del Cod. Atl.:

« Le confregazioni de' corpi son di tante varie potenze, quanto son le varietà delle lubricità de' corpi che insieme si confregano ».

« La confregazione de' corpi si divide in 2 nature principali, cioè: liquido con liquido, e denso con denso. Di queste ne nascie una terza natura, ch'è partecipante over composta delle due predette, cioè che si pò confregare il liquido sopra del denso, e 'l

denso sopra del liquido, cioè fressibile.

« Ecci una 4ª confregazione, (nel) tra la quale è la rota del carro, che si move sopra della terra, che non frega, ma tocca, e possi dire di natura del camminare con passi d'infinita minimità o parvità.

« I moti confregabili son di 2 nature, cioè piani e obliqui, e non mai in verso al centro del mondo, se non per accidente ».

Leonardo, dunque, dopo essere partito, per le sue classificazioni dell'attrito: dai moti che lo generano e dalla natura di esso, ne fa una terza, considerandone « le varie potenze » e cioè l'intensità.

Questa affermazione è importante e conferma l'altra, già citata, del foglio 41 r. del Cod. Arundel, nella quale è detto: « le confregazioni dei pesi son di tante varie resistenzie quanto son vari i corpi che insieme si confregano ». Per quanto Leonardo nei suoi calcoli, nelle sue applicazioni ed in diverse citazioni, assuma comunemente un coefficiente di attrito eguale ad ¼, deve ritenersi che questo valore egli assegnasse al coefficiente di attrito, per approssimazione, come valore medio dei materiali che impiegava. È noto che, nel caso che le superfici a contatto siano: metallo su metallo, legno su legno (bagnato), cuoio sopra legno o metallo (unto), bronzo su bronzo, che possono ritenersi i materiali sui quali più frequentemente egli faceva le sue osservazioni ed

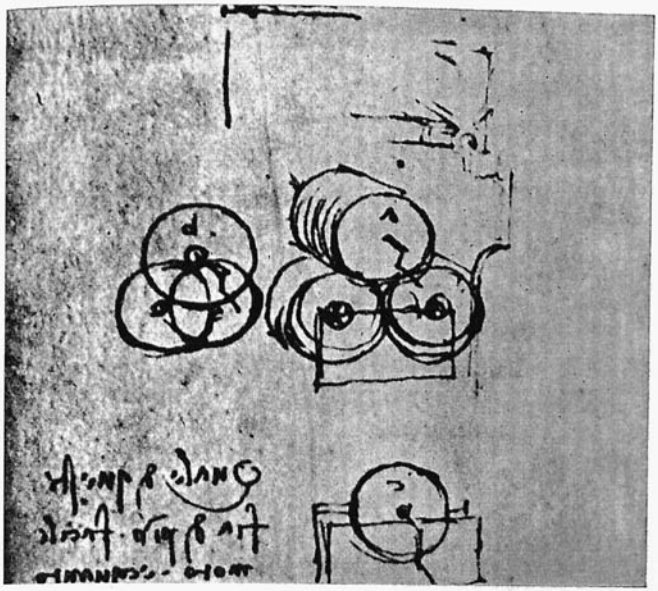


Fig. 60. - Studi sull'attrito nei perni. (Ms. 2037-9 r.)

esperienze, il coefficiente si aggira appunto attorno al valor 0,25, con molta approssimazione. Lo stesso valore di ¼ per il coefficiente d'attrito, assumerà del resto il Bulffinger (1727), e quello di 1/3 per tutti i corpi l'Amontons.

Ma nel brano considerato del Cod. Atlantico v'è pure per la prima volta accennato il caso dell'attrito tra liquido e liquido, che Leonardo chiaramente di-

stingue da quello tra solido e solido, e da quello misto. Ora, anche se non è probabile che egli abbia inteso riferirsi alla viscosità o attrito interno dei fluidi, non è meno significativo che abbia intuito la esistenza di una forma di resistenza nel moto dei fluidi.

Esplicito è invece il cenno all'attrito di rotolamento della « rota del carro che si move sopra della terra, che non frega, ma tocca », e che conferma il rilievo già fatto più sopra, ed, interessantissimo, il paragone del moto di rotolamento della ruota, « al camminare con passi di infinita minimità o parvità », che racchiude il moderno concetto matematico di limite. Stando all'enunciato del foglio 41 r. del Codice Arundel, Leonardo ritiene di dover dare al coefficiente di attrito di rotolamento e dei perni, lo stesso valore di quello dell'attrito radente, poichè afferma: « la confregazione circulare fia equale alla confregazione retta ». E questa affermazione trova riscontro nel foglio 72 V-b del Cod. Atlantico, dove più esplicitamente scrive: « ... e esso 4 è 'l vero contrapeso della confregazione del polo e della confregazione di sè medesimo ».

Si ritrova quindi ancora in questa frase, come in parecchie altre, alcune delle quali già citate, il valore di ¼ del coefficiente di attrito, ma non possono trascurarsi — a questo proposito — nè l'esplicito rilievo fatto al foglio 41 r. del Cod. Arundel, già men-

zionato, (« le confregazioni dei pesi son di tante varie resistenzie quanto sono i vari corpi che insieme si confregano »), nè quello del foglio 72 b del Cod. Atl.: « quelli corpi che son di più pulita superfizie ànno più facile confregazione », che concorda con l'osservazione contenuta nello stesso foglio: « ogni corpo resiste nella sua confregazione con potenzia equale al quarto della sua gravezza, essendo il moto piano e le superfizie dense e pulite », la quale viene appunto a spiegare che il valore di ¼ era da Leonardo assunto in questo caso particolare, che più comunemente si presentava, e comunque quando si considerino: il moto piano e le superfici di contatto « dense e pulite ».

Non altrimenti possono spiegarsi le contraddizioni apparenti che si trovano nei diversi enunciati, tanto più che egli sa perfettamente che: « le confregazioni de' corpi son di tante varie potenze, quante son le varietà delle lubricità de' corpi che insieme si confregano » (Cod. Atl. Fogl. 209 V-a) — dove lubricità vuol dire scorrevolezza —; e che « Omnia e qualunque cosa per sottile ch'ella sia, la quale s'interponga in mezzo infra lle cose insieme confregate, allegieriscie la difficultà di tale confregazione: Vedi la confregazione de' gran pesi, i quali fanno moti confregabili, che quanto magiore rote s'interpone, tanto si rende tale moto più facile; e così de con-

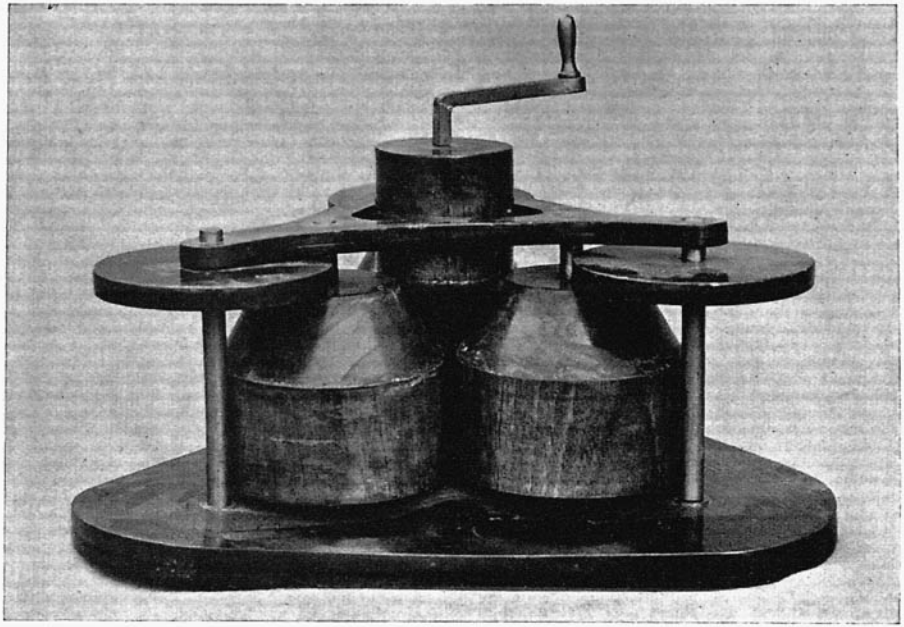


Fig. 61. - Modello ricostruito — su disegno di Leonardo — per lo studio dell'azione delle forze e dell'attrito in un sistema rotoide.



Fig. 62. - Esperimenti sull'attrito strisciante e nei perni. (Cod. Atl. 201 Va)

verso men facile, quanto il mezo fia più sottile, come sarebbe alcuna sottile untuosità; e così crescendo, meglio e più facile la rendano i graniculi di miglio, e più le palle di legno o curi, cioè rote cilindrali; e quanto tali curi fieno magiori, tanto i movimenti fiano più facili». (Cod. Forster, 2°-132 r.).

Affermazione che concorda con l'altra già citata del Fol. 85 v. del Cod. Forster II-2: « ... il quale moto fia tanto più dificile quanto il piano fia più ruvido e asspro. E che sia vero, movila, com'è decto, sopra palle in pian perfetto: vedrai che ssanza fatica si moverà ».

In queste due citazioni non è chiaro se Leonardo intenda parlare dell'attrito nelle ruote e nei perni o nei rulli — come lascerebbe intendere l'accenno al trasporto di grandi pesi —; in quest'ultima ipotesi è pertanto esatta la sua osservazione, poichè la resistenza di attrito al rotolamento è di fatto inversamente proporzionale al raggio del cilindro o rullo.

Ma tornando al valore di ¼ assunto da Leonardo per l'attrito, ci sembrano fondamentali e definitive le considerazioni del foglio 198 V-a del Cod. Atlantico, che sembrano concludere le sue esperienze in proposito e che confermano le ipotesi più sopra da noi avanzate. Scrive infatti Leonardo: « la confregazione de' corpi puliti e piani resiste al suo motore con potenzia equale al quarto della sua gravezza.

« a, sia il corpo confregato overo stracinato dal motore b; c, d, fia il piano pulito, dove esso corpo è confregato. Sono le confregazioni de' corpi di 4 sorte, delle quali la prima si è quando due corpi sono puliti e piani, come quì è proposto; la 2ª è quando il corpo stracinato e 'l piano dove si move è aspro; la 3ª è quando il corpo stracinato è aspro, e 'l piano ove si move è polito; il 4° modo è quando il corpo stracinato e 'l piano dove si stracina è aspro.

« Dà la sperienzia che la cosa pulita, stracinata per pulito piano, resiste nel moto al suo motore con potenzia equale alla 4ª parte della sua gravezza; e dell'altre seguenti 2 sorte tanto è a movere la cosa aspra sopra piano polito, quanto la cosa polita sopra piano aspro. La 4ª spezie è quando il corpo aspro è mosso sopra aspro piano ».

E' dunque ben chiaramente stabilito, in queste note conclusive, che Leonardo assume il valore del coefficiente di attrito eguale ad ¼, nel caso « de la cosa pulita, stracinata per pulito piano », secondo che « dà la sperienzia », e che negli altri casi egli sa che questo valore non è lo stesso, ma è eguale sia nel caso di un corpo ruvido trascinato sul piano liscio, che nel caso del corpo liscio trascinato su piano ruvido.

Leonardo non s'è naturalmente limitato a stu-

diare il moto dei corpi su superfici piane, ma ha anzi largamente trattato e sperimentato gli effetti dell'attrito radente sui piani inclinati, passando poi di conseguenza a considerare l'influenza della pendenza sullo sforzo di trazione, sia nel caso di corpi trascinati lungo il piano inclinato, sia nel caso dei veicoli.

Nel primo caso egli imposta chiaramente il problema scrivendo: « il peso del quale il suo moto si rende dificile per la confregazione che fa col pian dove si move, cresscierà tanto più di gravità quanto gli mancherà fatica nella confregazione ch'elli ha col pian dove si move. Questo si dimostra nel levarsi per linia forte oblica, che quasi il suo senplice peso è nella forza del motore, e 'l fregare poco » (Cod. Forster II-2-85 v.).

E' infatti intuitivo che trascinando un peso su un piano inclinato, oltre alla resistenza d'attrito radente, interviene l'azione della componente parallela al piano, detta anche gravità relativa. E' noto d'altra parte — se ci riferiamo alla figura 63 — che:

$$P : Q = \text{sen}\,(\alpha + \varphi) : \text{sen}\,(\theta + \varphi)$$

Ne deriva che, considerando, ad esempio, il caso più semplice nel quale $(\theta + \varphi) = 90°$ e quindi $\text{sen}\,(\theta + \varphi) = 1$, aumentando la inclinazione del piano e cioè l'angolo $(\alpha + \varphi)$, P aumenta fino a quando essendo $(\alpha + \varphi) = 90°$, $P = Q$. Che è precisa-

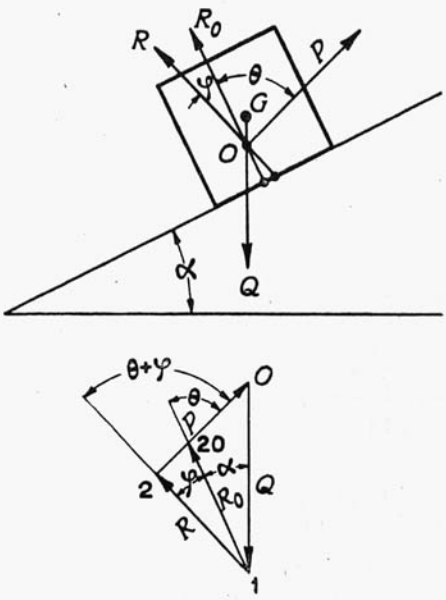


Fig. 63.

mente quanto esprime Leonardo quando dice: « cresscierà tanto più di gravità quanto gli mancherà fatica nella confregazione », introducendo anche l'osservazione che la pressione del carico sul piano inclinato si riduce, e per conseguenza diminuisce la resistenza d'attrito, quando θ è minore di 90°, ossia la P tende a sollevare il carico dal piano.

Lo stesso concetto espone nel foglio 85 v. del Cod. Forster II-2 quando scrive: « il peso del quale

il suo moto si rende dificile per la confregazione che fa col pian dove si move, cresscierà tanto più di gravità quanto gli mancherà fatica nella confregazione ch'elli à col pian dove si move.

« Questo si dimostra nel levarsi per linia forte oblica, che quasi il suo senplice peso è nella forza del motore, e 'l fregare poco ».

E ripete al foglio 201 V.a del Codice Atl. dove peraltro considera esplicitamente la inclinazione della forza motrice P, ossia il valore dell'angolo θ di tiro. Osserva infatti:

« Sempre la confregazione fia il quarto di quel peso che si stracina, il qual peso si fa tanto più lieve quanto elli è stracinato per linia più vicina alla sua linia che li piove addosso perpendiculare.

« Quanto più cresce 'l peso al corpo, tanto diminuisce la potenzia della confregazione.

« Quanto più cresce di gravezza il corpo stracinato sopra del sito dell'equalità, tanto diminuisce la potenzia della sua confregazione ».

« E quel peso si farà più grave sopra d'esso sito d'equalità, il quale fia stracinato da corda di minore obliquità.

« E tanto cresce la potenzia della confregazione al peso stracinato sopra il sito della equalità, quanto cresce l'obliquità alla corda che lo stracina ».

Il ragionamento di Leonardo appare chiaro se ci

riferiamo alla figura che egli stesso ha tracciato su questo foglio del Codice Atlantico e che spiega nel modo seguente: (Fig. 64)

« Quì d, con potenzia equale alla quarta parte del peso m, stracina esso peso, cioè con potenzia equale a una libra; e da c, ancora esso peso si stracinerà, ma con potenzia equale alla quarta parte del peso che resta in m; cioè, restando in m, 2 libre per causa dell'appendiculo mc reale, che lo sveglie in alto con potenzia di due; adunque esso appendiculo si carica di due libre e 2 ne resta in m; adunque con una potenzia che sia equale alla quarta parte d'esso 2 di m, si moverà m alla sua confregazione col pian che lo sostiene, in modo che, crescendo una mezza libra di potenzia sopra il 2 di c, esso peso si stracinerà del suo sito, e in dimostrazione e' pare che qui 2 libre e mezzo sien quelle che lo stracinano; ma come ài veduto, e' non è altro che mezza libra, la qual si fa equale alla resistenzia delle 2 libre che restano in m, e l'altre 2 libre se ne vanno in verso il motore c.

« a sostiene le 4 libre di m, b ne sostiene 3, c ne sostiene 2, d non ne sostiene parte alcuna, ma ne maneggia una colla confregazione, cioè con una potenzia equale al quarto d'esso peso m; adunque a lo sostien tutto, ma nol confrega, d non ne sostiene niente, ma tutto lo confrega, perchè in esso d non si tro-

va lieva nè contralieva, e 'l simile addiviene in a, che non v'è lieva e contro a lieva, nè in nessuna al-

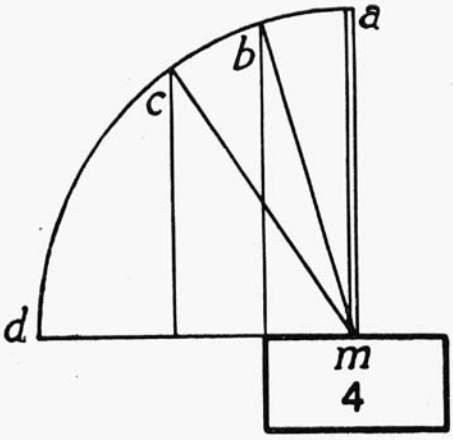


Fig. 64.

tra linia si trova essa lieva e contro a lieva ».

E partendo da queste considerazioni e da esperienze consimili, Leonardo trova ed enuncia la legge della pendenza limite, prima al foglio 209 V-a del Codice Atlantico, affermando:

« Ogni corpo confregato resiste sopra del sito ove si confrega per la quarta parte della sua gravezza »,

e poi più chiaramente ed esattamente al foglio 198 V-a dello stesso Codice Atlantico, scrivendo:

« La confregazione de' corpi puliti mancherà tanto più di resistenzia e crescerà di peso, quanto il sito dove si move è meno obbliquo, essendo il motore sopra il suo mobile.

« La confregazione de' corpi puliti mancherà tanto più di resistenzia e di peso, quanto il sito dove si muove è meno obliquo, essendo il motore più basso che 'l suo mobile.

« Quando l'obbliquità pulita dispone il grave pulito a pesare nella linia del moto per la quarta parte della sua gravità, allora il grave è per sè stessi disposto al moto del discenso.

« Il grave che si move e non si parte per moto circumvolubile, essendo il contatto della confregazione pulito, arà sempre la potenzia della confregazione per la quarta parte della sua gravezza ».

In questo enunciato vinciano è sinteticamente esposta la dimostrazione del comportamento di un grave trascinato sul piano inclinato. Riferendoci alle nostre notazione ed alla figura, Leonardo afferma precisamente che quanto meno il piano è inclinato rispetto all'orizzontale, tanto più aumenta Q_2 e diminuisce Q_1. In realtà, la formula che dà la forza P necessaria per trascinare il peso lungo il piano è:

$$P = fQ_2 + Q_1$$

nella quale fQ_2 aumenta diminuendo la inclinazione del piano (« crescerà di peso quanto il sito dove si move è meno obbliquo »), mentre Q_1 diminuisce, ossia « mancherà di resistenzia », quando il « motore è sopra il mobile ». Nel caso del moto in discesa, Leonardo sembra meno chiaro, poichè afferma che l'attrito « mancherà di peso », volendo probabilmente rilevare che la P diventa minore (Fig. 65).

E' peraltro chiarissimo e preciso quando afferma che il grave è « disposto al moto del discenso », ossia a scendere lungo il piano inclinato, quando la inclinazione è tale che la pendenza eguaglia il coefficiente di attrito, ossia: $Q_1 = fQ_2$, nella quale f, per Leonardo, è come di solito posto eguale ad 1/4.

Citeremo infine, prima di segnalare gli studi di Leonardo sulla trazione, un altro caso dell'attrito da

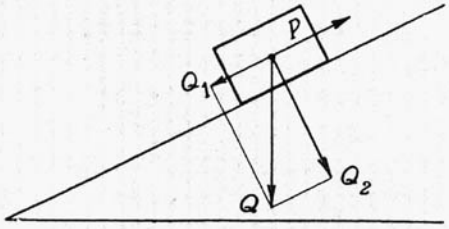


Fig. 65.

lui segnalato al foglio 72 del Codice Atlantico, e precisamente quello tra superfici flessibili, per le quali egli ammette che la resistenza di attrito cresce proporzionalmente alla estensione delle superficie a contatto. Scrive infatti:

« De' corpi di lati ineguali e d'uniforme aspricità piegabile, la confregazione fatta pel suo lato maggiore sarà di maggiore potenzia ».

« Pruovasi se la particula dell'aspricità piegabile, come panno, corda e simili, resiste come 1, egli è necessario che le 4 particule resistano per 4, e le cento per cento; ma se l'una è carica di maggior peso, essa particula si piega; e 'l corpo che si dè confregare non ha più essa particula che lo impedisca, per essere lei piegata e spianata e fatta senza alcuna resistenzia ».

Gli scritti e le citazioni che abbiam riportato ci sembrano sufficienti a provare, come già rilevammo all'inizio, che il contributo apportato dal genio leonardesco alle ricerche sull'attrito è imponente.

Questo nostro grande meccanico non è solo stato il primo che abbia intuito quale grande importanza ed influenza avesse la resistenza d'attrito nelle macchine, ma è anche stato il primo che abbia gettato le basi sperimentali teoriche di questi studi, che i successori non hanno fatto che perfezionare e completare, trovando risultati che non si staccano fondamen-

~ ATTRITO ~

~ LE LEGGI DI LEONARDO

I *Le confregrazioni dei pesi son di tante varie resistenzie quanto sono vari i corpi che insieme si confregano.* (Cod. Arundel 41r)

Bisognia sapere la natura del contatto che esso peso ha col piano dove si confrega per lo suo moto, perchè vari corpi anno varie confregazioni. (Cod. Forster II¹-87r.)

II *Le confregazioni de' corpi son di tante varie potenze quanto son le varietà delle lubricità de' corpi che insieme si confregano.* (Cod. Atl. 209 V-a.)

Quelli corpi che son di più pulita superfizie anno più facile confregazione. (Cod. Atl. 72 V-b.)

III *Omnia e qualunque cosa per sottile ch'ella sia, la quale s'interponga in mezo infra lle cose insieme confregate allegieriscie la difficultà di tale confregazione* (Cod. Forster II¹-138r.)

Se saranno corpi di varie superfizie, cioè l'une sia delicata e pulita e bene unta o insaponata, e sia mossa sopra un piano di simile natura, essa sarà molto più facile al movimento che quella che sarà ruvida a uso di lima o di rasspa. (Cod. Forster II¹-87r.)

IV *Se le superfizie de' corpi che insieme si confregano saranno dense e di resistentia planitia, allora il contatto grande fia equale a quel picolo.* (Cod. Arundel 34-r)

V *La confregazione si fa di duplicata fatica in duplicato peso.* (Cod. Forster III-72r.)

Infralli corpi d'egual lubricità il più grave è più potente resistentia nella sua confregazione (Cod. Atl. 72 V-b.)

VI *La confregazione facta da uno medesimo peso sarà d'eguale resistentia nel principio del suo moto ancora che l contatto sia di diverse larghezze e lunghezze.* (Cod. Forster II¹-132 v.)

LE LEGGI ATTUALI ~

I La resistenza d'attrito dipende dalla natura dei materiali a contatto.

II La resistenza d'attrito dipende dal grado di lavorazione delle superficie a contatto.

III La resistenza d'attrito dipende dalla eventuale presenza di un fluido interposto.

IV La resistenza d'attrito è indipendente dalla estensione delle superficie di contatto entro certi limiti della pressione.

V La resistenza d'attrito è proporzionale alla pressione che preme un corpo contro un altro.

VI All'inizio del moto, la resistenza d'attrito assume valori maggiori (*attrito di primo distacco*)

talmente dalle leggi vinciane.

E trovate e stabilite le leggi dell'attrito, sia pure imperfettamente, le ha applicate nella soluzione di problemi riguardanti le sue macchine ed i suoi veicoli. In molti fogli dei diversi codici e fra gli altri nei fogli: 81 R-b; 197 R.b; 236 V.a; 198 R.a; 209 V.a; 112 R.b; 201 V.a; 154 V.b; del Codice Atlantico; nei fogli: 85 v.; 87 r.; del Cod. Forster II: nei fogli 40 R. e 41 V. del Cod. Arundel, tratta i diversi problemi della resistenza d'attrito nel caso di piani inclinati, delle bilancie, delle carrucole.

Come già ha rilevato Roberto Marcolongo, nella sua interessante ed esauriente memoria su « la carrucola, le taglie e il problema delle reazioni vincolari », non poteva sfuggire a Leonardo la importanza del fattore « pressione » sul polo di una carrucola, così come non gli è sfuggito l'influsso dell'attrito nei perni, tanto che ne tiene calcolo nella soluzione dei problemi di equilibrio dei perni stessi.

A questo proposito, riteniamo particolarmente interessante riportare quanto egli scrive al foglio 72 V-b del Cod. Atlantico, al quale si riferisce la figura tratta dal disegno vinciano.

« Ogni corpo resiste nella sua confregazione con potenzia equale al quarto della sua gravezza, essendo il moto piano e le superfizie dense e pulite.

« Sia divisa la gravità del corpo strascinato, in quat-

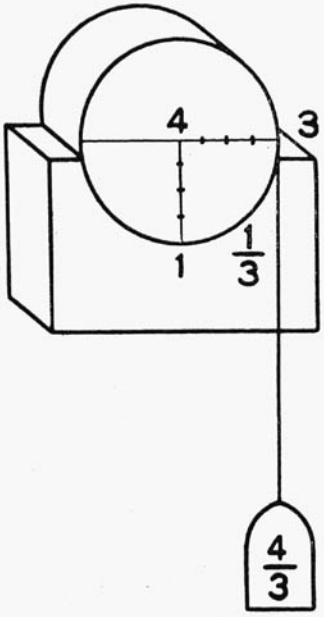


Fig. 66.

tro parti equali, e il simile si facci alle braccia della sua bilancia e la calculazione delle potenzie de' motori e delle confregazioni de' corpi mossi saran di più facile investicazione.

« Multiplica il braccio del contrappeso per tante volte 4, quante son le volte che esso riceve in sè il

braccio della confregazione del polo, e dalla somma leva 1, e col rimanente parti la confregazione del polo, e l'avvenimento multiplica per 4, e la somma fia il contrappeso della confregazione del peso di sè e del predetto polo ».

In questa nota il cenno — che ripeterà successivamente — al « braccio della confregazione del polo », non solamente conferma in Leonardo la chiara nozione che egli aveva del concetto di momento, in base al quale risolve il problema di equilibrio di questo polo girevole, come in altri casi, ma ci prova anche che egli teneva conto del momento resistente d'attrito.

Analogo ragionamento, sempre tenendo conto dell'attrito che si genera nel polo, sotto l'azione dei due pesi del subbio e del contrappeso, fa al foglio 41 v. del Cod. Arundel.

Estendendo le sue esperienze e le sue conclusioni circa l'attrito ai veicoli, Leonardo arriva a risultati ed a leggi che concordano perfettamente con i dati sperimentali più recenti, nel campo della trazione, anche se non sempre le sue dimostrazioni possano ritenersi rigorose. In taluni casi, anzi, le sue conclusioni derivano esclusivamente dai risultati sperimentali che egli ha verificato.

Al foglio 211 r.a del Cod. Atl., sotto un disegno chiarissimo e suggestivo, egli scrive:

« Pruova come due rote di pari peso e quella che arà più sottil polo sarà più facilmente mossa. La rota A, perchè ha grosso polo, non resta da terra a lui se non 2 once; la rota B, perchè l'ha sottile, s'alza la linia di terra insino al detto polo, insino in 3 once, onde, per la pruova di sotto dell'albero e delle rote, si dimostra in queste seconde due rote che quella ha più sottil polo, quella sarà con più comodità mossa ».

E, riferendosi alla figura inferiore continua:

« Pruova come la rota più alta più facilmente con pari peso è tirata. Ogni e qualunque cosa corporea si ripartirà in due angoli equali, e anderà in alto con pari grossezza; quanto più alta fia percossa o tirata, più facilmente sarà gittata o tirata a terra, perchè, quanto più s'allontana da 'l suo nascimento, più s'indeboliscie.

« Esempio: poni mente l'albero di sopra figurato, che, per la legatura di sopra, l'albero è tirato in terra da un solo bue, la parte di piè non fia mossa da 9; e questo esemplo è dato per dimostrare che quanto, la rota è maggiore, più alto è il suo cientro da 'l piano de la terra, e più comodamente fa il suo offizio ».

Leonardo giunge bensì, in conclusione, a stabilire in questa sua dimostrazione, che la resistenza alla trazione di un veicolo diminuisce con l'aumentare del diametro delle ruote, ma il suo ragionamento non può rigorosamente applicarsi ai due casi prospet-

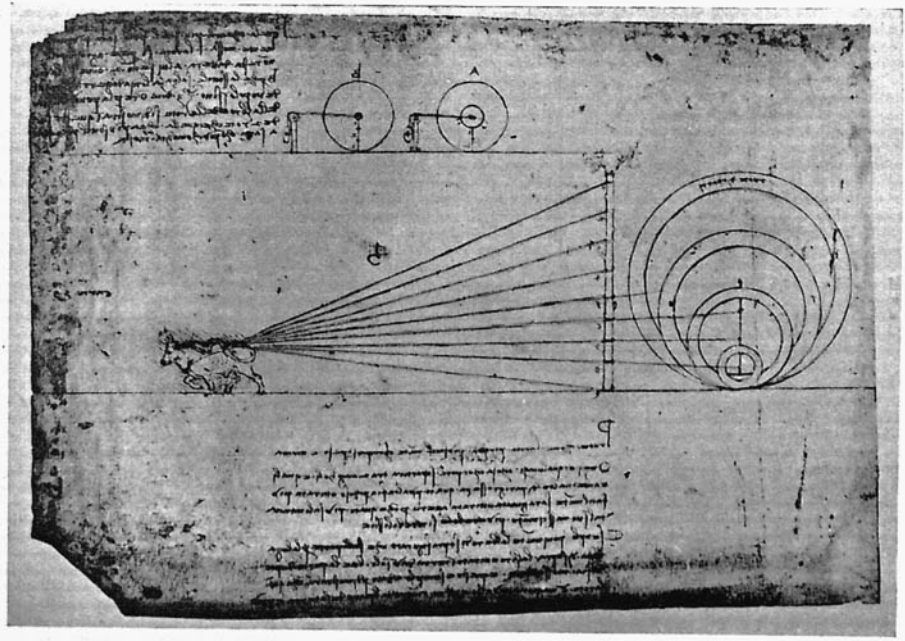


Fig. 67. - Studi sullo sforzo di trazione delle ruote di un carro
Cod. Atl. 211 Ra)

tati del solido incastrato ad un estremo e sollecitato eccentricamente (l'albero) e della ruota sottoposta ad uno sforzo di trazione obliquo. E' noto che il calcolo della resistenza alla trazione dei veicoli ordinari è piuttosto complesso, tanto che, tra le conclusioni del Coulomb e quelle del Dupuit, senza tener conto delle trattazioni teoriche di Gerstner, Coriolis ed altri, v'è un divario sensibile. Il Coulomb, infatti, ammette che la forza di trazione applicata all'asse è inversamente proporzionale al raggio della ruota, mentre il Dupuit afferma che essa è inversamente proporzionale alla radice quadrata del raggio.

In pratica il limite al raggio delle ruote è posto — come è noto — e dal conseguente aumento di peso del veicolo e dagli effetti della inclinazione del tiro.

Sempre a proposito del diametro delle ruote dei veicoli, Leonardo riafferma che il « moto si fa più facile », quando aumentino i diametri delle ruote, trattando il caso di un carro a 4 ruote, nel Cod. Forster II-2-124 r., scrivendo: (Fig. 68)

« Se lle rote saranno di pari altezza, il carro si moverà con cierta qualità di forza. Ma se scambi le 2 dirieto in rote di più altezza, esso si moverà con più facilità. Ma sse alle prime rote tu scambiassi quelle rote dinanzi in rote di più bassezza, in modo che medesimamente le rote dinanzi fussino basse e

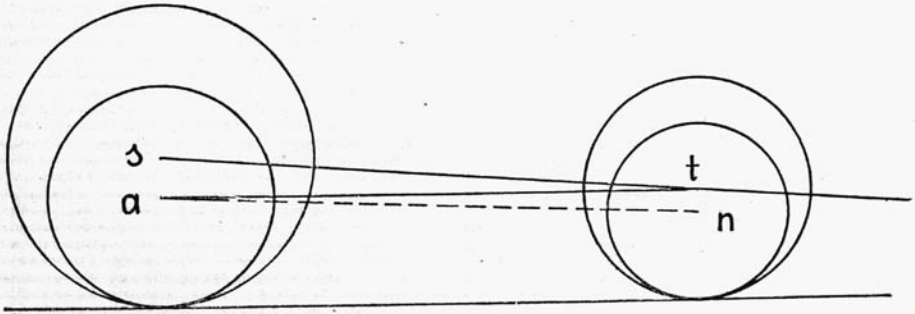


Fig. 68.

quelle dirieto alte, il primo moto si farà più difficile e più faticoso.

« a t sia il cientro delle rote equali, s t sia il cientro delle ruote sproporzionate cressciendo quelle dirieto, che fa il moto facile; a n siano i cientri delle rote abassando quelle là dinanzi. E tanto più faticoso l'un moto che ll'altro, quanto la magiore cressce più che lla prima, e quanto la minore diminuissce più che lla prima ».

Il ragionamento qui è chiaro: se in un dato carro si aumentano i diametri delle ruote posteriori, lo sforzo di trazione diminuisce, conseguentemente alla nota legge; il risultato non è però lo stesso se si riducono i diametri delle ruote anteriori. Leonardo vuole cioè stabilire che la diminuzione dello sforzo di trazione in questo caso non è determinata dal fatto che le ruote posteriori siano più alte delle anteriori, ma dal fatto che si sono aumentati i diametri di tali ruote. Ed è nel vero.

Abbiam visto che Leonardo conosce e valuta l'attrito nei perni, e ne tien conto non solamente nella soluzione dei problemi di equilibrio delle bilancie e delle carrucole, ma anche nella costruzione delle ruote dei veicoli, tanto che disegna al foglio 376 del Cod. Atlantico, un asse di carro con ruote solidali, sul quale la cassa del carro poggia a mezzo di rulli cilindrici. E numerosi altri disegni di « carri di facile movimento »,

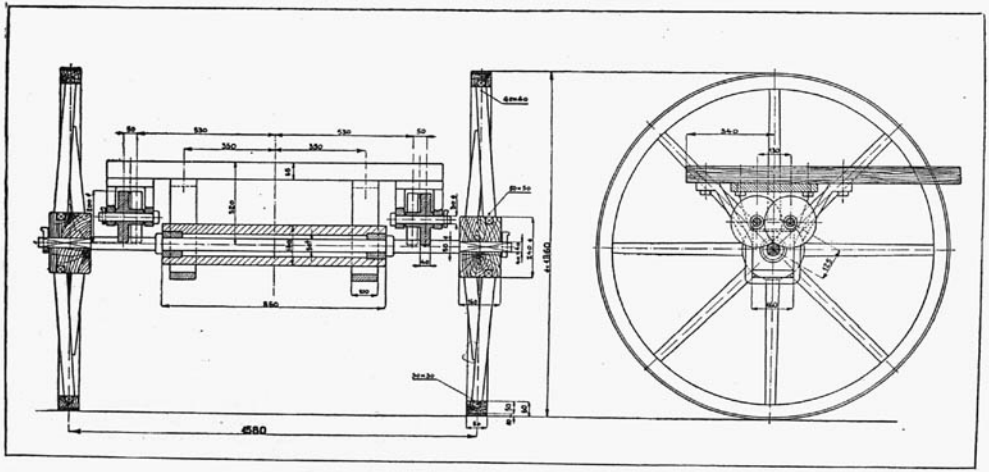


Fig. 69. - Disegno costruttivo dell'assale di un carro su rulli dal foglio 376 R.c. del Cod. Atlantico.

con sistemi diversi di « bilichi » o rulli, ci lascia, come quello del foglio 9 recto del Ms. 2037, nel quale afferma: « questo è un carro molto facile a tirare; ma fa che i poli sieno sottili »; e nella stessa tavola schizza l'apparecchio sperimentale sotto il quale ha scritto: « come si prova che il polo sottile è facile » (vedi figura a pagina 157).

Ma le deduzioni più interessanti a questo proposito si trovano nel foglio 305 V-b del Cod. Atlantico, che stabiliscono un'altra importante norma costruttiva, da noi oggi teoricamente accertata.

Nel caso delle ruote portanti, è noto infatti che la resistenza alla trazione del veicolo diminuisce adottando perni od assi di piccolo raggio, perchè tale resistenza decresce con il diminuire del rapporto tra il diametro dei perni dell'asse e quello delle ruote.

E Leonardo scrive: « In fralle rote d'equale diamitro, quella fia di più facile revoluzione, la quale da minor polo sostenuta fia ».

E più sotto: « Tutto il peso delle rote è sostenuto dai sostentaculi de' lor poli; e tanto quanto essi poli entrano per diamitro nel diamitro della rota, tanto il peso d'essa rota diminuisce al suo motore ».

Successivamente ancora: « Quella rota fia di più facile movimento, della quale il diamitro del suo polo entrerà più volte nel diamitro d'essa rota ».

Osserva infatti anche al foglio 155 V-b del Cod. Atl.

« la confregazione, che fanno i poli delle rote colle concavità che li ricevano, son causa di render difficile il loro voltare », ed al foglio 305 V-b dello stesso codice: « quel polo, che, sanza mutazione di sito, userà di sè minor contatto col suo sostentaculo, fia di più facile revoluizione »; espressione che, avvicinata all'altra del foglio 9 del Ms. 2037: « come si prova che il polo sottile è facile . . . come il contatto è grande il peso cresce », permette di concludere che Leonardo considerava la resistenza di attrito negli assi dipendente, e dal peso sopportato, e dalla superficie di contatto, ossia dal raggio del polo, praticamente dunque giungendo alle conclusioni degli sperimentatori successivi, circa l'attrito sull'asse delle ruote, poichè come abbiam sopra visto, tien conto anche del rapporto fra il raggio del perno e quello del diametro della ruota.

Al foglio 363 V-c del Cod. Atl. accenna anche ad una dimostrazione grafica attorno al comportamento di un perno, affermando che la superficie da considerarsi agli effetti dell'attrito nel perno della ruota è quella effettiva di appoggio. E così scrive sopra la figura che riproduciamo: « infralle rote d'equal diametro, quella è di più facil movimento, che da più sottil polo è sostenuta. Chiara cosa è che quella rota fia di più facile movimento, della quale il dia-

mitro del suo polo entra più volte nel diamitro d'essa rota » (Fig. 70).

Accennando alla figura a fianco nota: « Questa rota è tutta polo. E' falsa, perchè il polo e 'l contrapeso insieme giunto pesano 200 libbre, e 'l quarto di 200 è 50; adunque 50 libbre moverà 200. Or cerca nella 5ª del primo ». E conclude con la notazione: « In quanto alla difinizione di questa figura, diremo in questo modo: cioè, se la rota over circulo di sopra fussi la testa d'uno polo, il quale per se pesassi 100 libbre, esso peso non si posa, e si carica sul suo sostentaculo a-n-b-o-p, certo sì; o, se così è, il contatto del sostentaculo co 'l polo sta con forza 100 libbre, che viene a fare non altrimenti che se uno colle mani aggravando con forza over peso di 100 libbre contr'al polo, il quale peso sarebbe tutto contro alla facilità del motore d'esso polo ».

Se infine ricordiamo quello che scrive al foglio 209 V.a del Cod. Atlantico, già riportato: « ecci una quarta confregazione, tra la quale è la rota del carro, che si move sopra della terra, che non frega, ma non tocca » e che chiaramente si riferisce all' attrito di rotolamento, possiamo dedurre che Leonardo distingueva le due principali cause di resistenza alla trazione per veicoli ordinari su strada piana e cioè: l'attrito sull'asse delle ruote e quello di rotolamento.

Al foglio 193 R. b del Cod. Atlantico particolar-

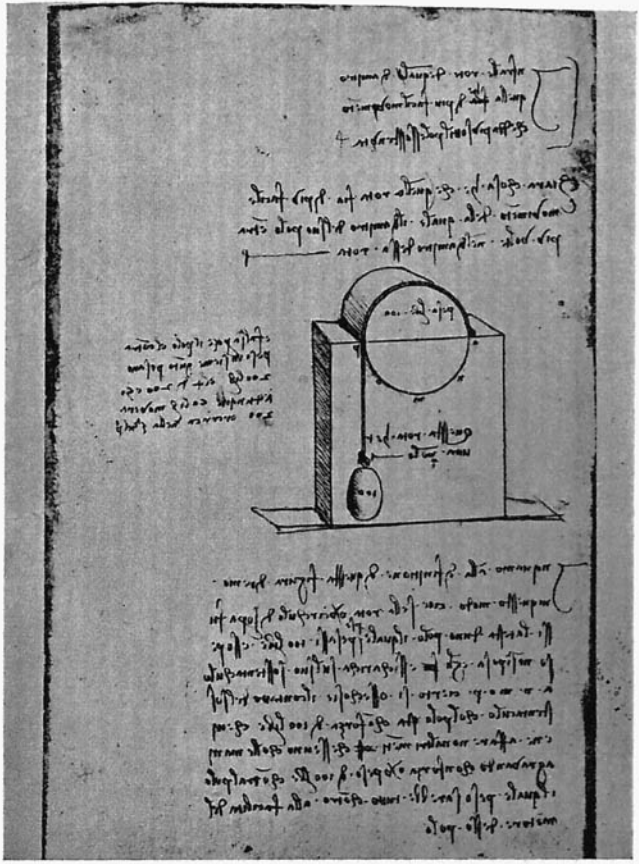


Fig. 70. - Attrito nei perni (Cod. Atl. 363 V.c.)

mente si sofferma a considerare la trazione di un corpo su un altro, facendo una minuta e particolareggiata distinzione tra le caratteristiche del mobile e quelle del piano, sul quale esso si muove, e includendo — almeno stando alle figure — anche il caso delle ruote o rulli rotolanti sul piano. Egli scrive infatti:

« Ne' semplici tirari de' corpi densi l'un sopra dell'altro. Perchè sempre le confregazioni de' corpi densi sono equali alla 4ª parte de' pesi confregati; ma nelli composti tirari, cioè con lieve, le quali son di più nature, cioè semplice e composte, semplici son quelle nelle quali solo una lieva s'adopera, composte son quelle che molte lieve movan l'una l'altra; ma quì tratterò della semplice.

« Mobile duro con piano duro.
« Mobile tenero con piano tenero.
« Mobile duro con piano tenero.
« **Mobile tenero con piano duro.**
« Mobile aspro con piano pulito.
« Mobile polito con piano aspro.
« Mobile aspro con piano aspro.
« **Mobile polito con piano pulito.**
« Mobile aspro e duro con pian tenero, mobile aspro con....
« Aspro duro con aspro duro, moto d'ultima difficultà

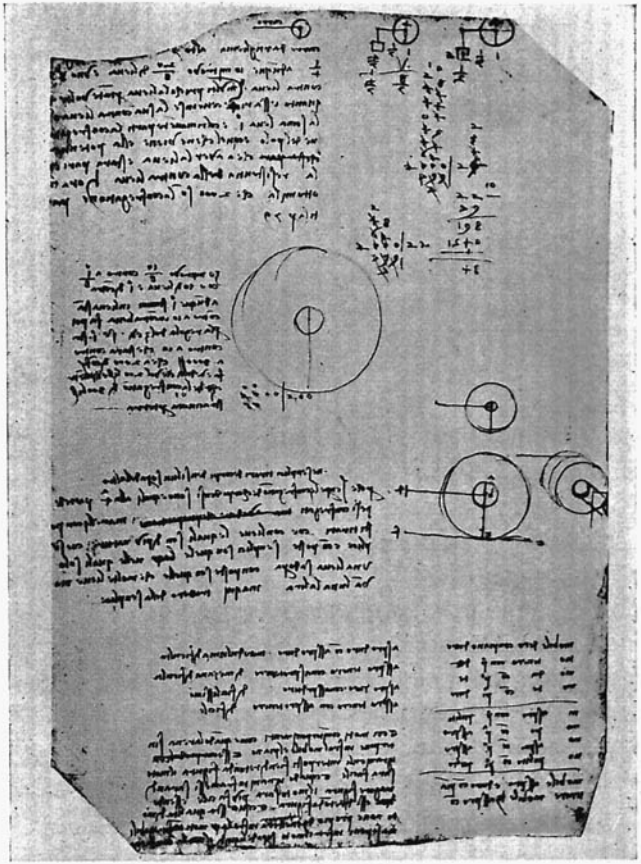


Fig. 71. - Studi sull'attrito di rotolamento e nei perni (Cod. Atl. 193 Rb.)

« Aspro tenero con aspro tenero di mezzana difficultà.

« Aspro duro con aspro duro, difficilissimo.

« Aspro tenero con aspro tenero, difficile.

« Ecci moti con interponimenti, come quando la rena s'interpone infra 'l mobile e 'l piano, e se i graniculi interposti fien di rotonda figura, il moto sarà facile, e quando i grani inframessi saranno di maggior figura, il moto sarà più facile, essendo essi di retonda figura, e questa qualità di moto non è proprio da metter infralli moti confregabili, ma si pone infra il moto sopra de' liquidi e... la confregazione ».

Questo brano viene a confermare che Leonardo — si tratti di moto strisciante o di moto di rotolamento — distingue le diverse specie di attrito, a seconda della natura e del grado di lavorazione delle superficie a contatto, come abbiamo già avuto occasione di notare, e anzi esplicitamente avverte quali sono i casi che offrono la maggiore resistenza di attrito, classificandoli: moto « d'ultima difficultà », « difficilissimo », di « mezzana difficultà », o « difficile », completando la citazione del Cod. Arundel (41 r.). Nell'ultima parte poi riprende il caso in cui si interpongano tra i corpi a contatto sfere o rulli, che viene assimilato al caso di interposizione di un lubrificante.

Del resto egli si affida alla esperienza quando vuole determinare lo sforzo di trazione e, al foglio 86 V. v.

~TRAZIONE~

LE LEGGI DI LEONARDO

I *Pruova come la ruota più alta più facilmente con pari peso è tirata* (Cod. Atl. 211-R-a)

Se lle rote saranno di pari altezza, il carro si moverà con cierta qualità di forza. Ma se scambi le due dirieto in rote di più altezza, esso si moverà con più facilità. (Cod. Forster II²-2-124.r)

II *Ma fa che i poli siano sottili.*
Come si prova che il polo sottile è facile. (Ms. 2037-9.r)

Pruova come due rote di pari peso e quella che arà più sottil polo sarà più facilmente mossa. (Cod. Atl. 211-R-a)

Infralle rote d'equal diamitro, quella fia di più facile revoluzione, la quale da minor polo sostenuta fia. (Cod. Atl. 305-V.b)

Quella rota fia di più facile movimento della quale il diamitro del suo polo entrerà più volte nel diamitro d'essa rota. (Cod. Atl. 305-V.b)

III *Ecci una 4ª confregazione, tra la quale è la rota del carro, che si move sopra della terra, che non frega ma tocca...* (Cod. Atl. 209-V.a)

Quando vòi sapere la quantità della forza che debe per diverse obliquità di strade stracinare un medesimo peso, tu ài a fare e ssagiare che forza è cquella che per isstra piana muove il peso, cioè ssagiare la natura della sua confregazione (Cod. Forster II²-86 V.v)

LE LEGGI NOSTRE

I I grandi diametri delle ruote diminuiscono la resistenza alla trazione del veicolo.-

II La resistenza alla trazione del veicolo diventa minore quanto più è piccolo il rapporto tra il diametro dei perni dell'asse e quello delle ruote.-

III La resistenza dovuta al rotolamento è proporzionale al coefficiente d'attrito ed al peso.-

del Cod. Forster II-2: « quando vòi sapere — scrive — la quantità della forza che debe per diverse obliquità di strate stracinare u' medesimo peso, tu ài a ffare e ssagiare che fforza è cquella che per isstrada piana muove il peso, cioè a ssagiare la natura della sua confregazione; e non la sapiendo, nè volendone fare prova, proponi una dificultà a tuo modo, e quella va variando secondo l'obliquità della strada, donde esso peso debe essere tracinato. Inperochè diverse obliquità fanno diverse fatiche al suo contatto, e lla ragione si è che se 'l peso che ssi debe movere, sarà posato in terra piana e per quella debbe essere stracinato, cierto esso peso sarà nella prima potenzia di dificultà, perchè tutto si sostiene sopra la terra e niente sopra la corda che llo debbe movere. Ma sse ttu lo vorai tirare per istrada molto erta, tutto il peso che esso dà di sè alla corda che 'l sostiene, manca al contatto della sua confregazione; ma che bisognia mosstrare altra ragione più evidente: tu ssai che a ttirarlo per lo ritto rasentando e toccando alquanto 'u moro (muro), che esso peso è quasi tutto sulla corda che 'l tira, e picola cosa ne resta sul muro, dove si confrega ».

Ed è lo stesso ragionamento già seguito ripetutamente nel caso del piano inclinato, quì particolarmente applicato al rilievo sperimentale dello sforzo di trazione su strade in pendenza. Ma se in questo

caso Leonardo sembra ricercare le condizioni di equilibrio dinamico del sistema, in altri casi, come quando ricerca la « regola di provare che forza vole un carro tirato per le montagne o altre linie obblique » Cod. Forster II-2-108 r.) riduce il problema ad una questione

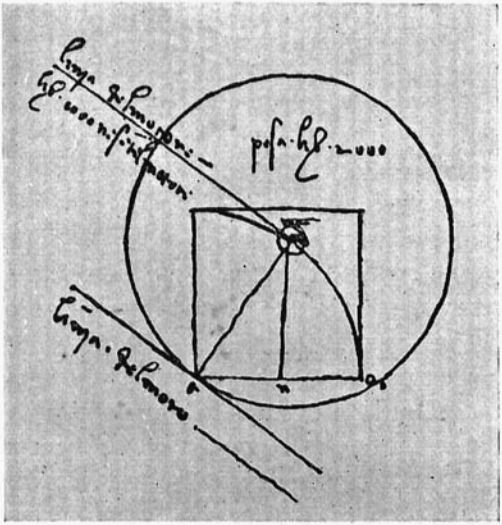


Fig. 72.

di equilibrio statico e scrive infatti: « perchè m è il cientro del peso e ssi posa sopra la linia obbliqua in a, e 'l perpendiculo della gravità è nel mezo della linia a-o nel punto n, essa gravità diminuisce la metà del suo peso al suo motore » (Fig. 72).

Leonardo non fa quì cenno all'attrito di rotolamento, ma accenna al caso particolare di un piano inclinato di 30°, nel quale appunto la forza equilibrante — che nel disegno è parallela al piano — è la metà del peso considerato. E non va trascurato il fatto che in questo come in altri disegni, egli tale « linia del motore » assuma parallela al piano, ossia praticamente nella direzione più favorevole al tiro.

In altro caso studiando le condizioni di tiro di un carro al foglio 114 r. del Ms. H, Leonardo rileva che per la inclinazione delle stanghe esiste — in talune circostanze — una componente verticale del peso del cavallo che grava sulle ruote anteriori ed annota infatti sotto la figura: « n-a sostiene in parte il peso del cavallo cioè la rota dinanzi, la rota dirieto sostiene il peso tirato a-c » (Fig. 73).

In conclusione anche nel campo della trazione — come in quello dell'attrito — egli raggiunge, attraverso la ricerca sistematica, risultati che concordano con le attuali teorie. E' comunque il primo che di queste teorie abbia gettato le basi e che concepisca la macchina come noi la concepiamo e cioè come « un insieme di corpi resistenti, atti a ricevere movimento da una forza naturale, a trasformare questo movimento in maniera determinata, ed a trasmetterlo — così trasformato — per eseguire del lavoro meccanico » secondo la definizione del Reuleaux.

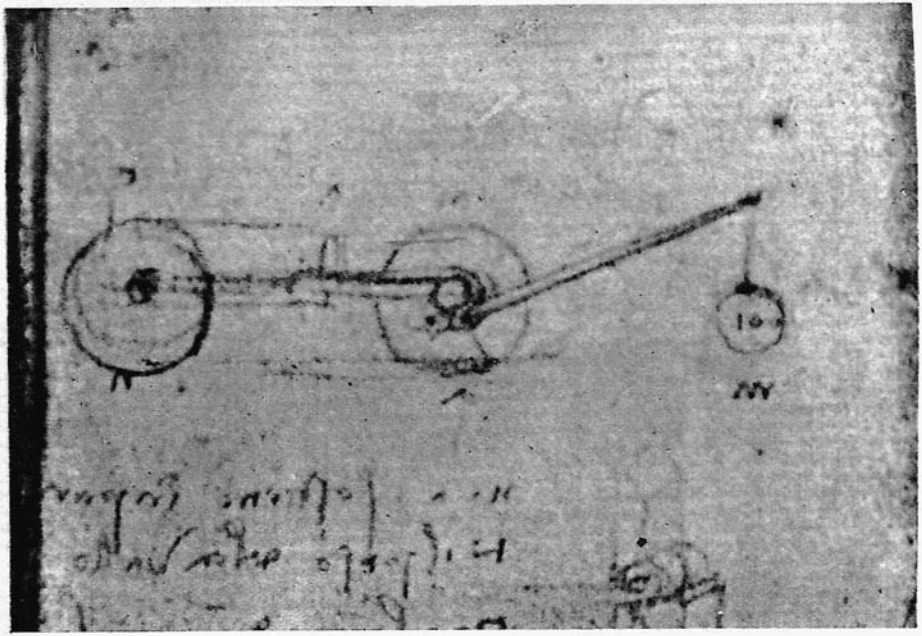


Fig. 73. - Studi sulla distribuzione del peso sulle ruote di un carro
(Ms. H-114 R.)

Negli antichi, la macchina era semplicemente un mezzo per ottenere un dato movimento, successivamente divenne un complesso atto a fornire della forza motrice e formante un tutto a sè stante; con Leonardo diviene un insieme di organi, di meccanismi distinti, di elementi cinematici, che egli studia e considera separatamente. Con Leonardo si introduce nella macchina il concetto di attrito e quindi quello di rendimento che sta alla base della scienza delle macchine.

2514811 RS

G. CANESTRINI: « Attrito e trazione nella meccanica di Leonardo ». Annali dei Lavori Pubblici, fasc. 2. Roma, 1939 XVII.

INDICE

INDICE

I° CAPITOLO

La Macchina nella concezione vinciana . Pag. 9

II° CAPITOLO

Veicoli «di facile movimento» . . . . . » 65

III° CAPITOLO

Attrito e Trazione . . . . . » 131

ISTITUTO ROMANO DI ARTI GRAFICHE
DI TUMMINELLI & C. - EDITORI
MILANO - ROMA

19.U.232
BNC-FIRENZE



BLIOTECA

LIRE QUINDICI