

DELLA
SCIENZA MECANICA
E DELLE VTLITÀ
Che si traggono da gl'istrumenti di quella.
O P E R A
Causata da manoscritti dell' Eccellentissimo Matematico
G A L I L E O G A L I L E I,
DAL CAVALLIER LVCA DANESI
D A R A V E N N A .
All' Illustrissimo Sig. Patrone Colendissimo
F. VALERIO SPRETI
COMMENDATORE GEROSOLIMITANO.



In RAVENNA, Appresso gli Stamp. Camerili.
1649. (Con licenza de' Superiori, e Privilegio.)

Degno di grandissima considerazione mi è parso, avanti che discendiamo alla speculazione delli strumenti meccanici, il considerare in universale, e di mettere quasi inanzi agli occhi, quali siano i commodi, che dai medesimi strumenti si ritraggono: e ciò ho giudicato tanto più doversi fare, quanto (se non m'inganno) più ho visto ingannarsi l'universale dei meccanici, nel volere a molte operazioni, di sua natura impossibili, applicare machine, dalla riuscita delle quali, ed essi sono restati ingannati, ed altri parimente sono rimasti defraudati della speranza, che sopra le promesse di quelli avevano conceputa. Dei quali inganni parmi di avere compreso essere principalmente cagione la credenza, che i detti artefici hanno avuta ed hanno continuamente, di potere con poca forza muovere ed alzare grandissimi pesi, ingannando, in un certo modo, con le loro machine la natura; istinto della quale, anzi fermissima costituzione, è che niuna resistenza possa essere superata da forza, che di quella non sia più potente. La quale credenza quanto sia falsa, spero con le dimostrazioni vere e necessarie, che averemo nel progresso, di fare manifestissimo.

Questo passo, con il quale Galileo apre la sua opera sulle macchine e la meccanica, marca la distanza tra la scienza galileiana delle macchine e l'empirismo spesso velato di ciarlataneria dei "meccanici" che promettevano mirabilie che non potevano poi realizzare. Le macchine, per quanto ingegnose e complesse, non possono "ingannare la natura" facendola operare contro la sua stessa costituzione. Al più, le macchine possono dirigerla, in modo che le sue leggi vengano indirizzate verso opere utili e che si possano compiere con una certa facilità operazioni che senza di esse sarebbero risultate faticose e forse impossibili. Impossibili non in linea di principio, perché nessuna macchina può fare quello che fare non si può, ma in linea di fatto, dato che senza macchine occorrerebbero forze così grandi da non potersi trovare. Le macchine dunque servono non ad ingannare, ma ad aiutare la natura, cioè a rendere facili operazioni e risultati che senza di esse non si sarebbero potuti ottenere. Per questo non servono grandi meccanismi e complicate costruzioni, ma sono sufficienti macchine semplici, il cui funzionamento si basa su pochi principi naturali ed evidenti.

A differenza della meccanica dei "meccanici", quella di Galileo si fonda su due caposaldi: la semplicità delle macchine e delle leggi che le regolano e la struttura matematica della loro teoria. Due principi complementari, perché non si potrebbero dare regole matematiche di macchine complesse e articolate né si potrebbero dare leggi certe al di fuori del linguaggio matematico. Ma la semplicità e la chiarezza matematica producono anche un altro effetto: la durata. Durata in quanto macchine, perché poco soggette a rotture e ad usura, ma soprattutto durata in quanto meccanismi, perché la loro semplicità stessa le rende difficilmente migliorabili e quasi eterne. Così mentre le costruzioni a volte mirabili degli ingegneri dei secoli passati sono oggi valide solo come oggetti di antiquariato, le macchine studiate da Galileo continuiamo a usarle quotidianamente, senza nemmeno renderci conto che gli umili strumenti di cui ci serviamo nelle nostre faccende di tutti i giorni hanno contribuito alla nascita della scienza moderna.

Nella visita avremo una guida d'eccezione: lo stesso Galileo e il suo trattato che seguiremo passo passo, quasi sfogliandone le pagine i cui testi più significativi sono riportati sui pannelli che ci accompagneranno nel nostro percorso.

1. A cosa servono le macchine?

Prima di cominciare, fermiamoci un momento a seguire Galileo nella sua risposta a questa domanda. Supponiamo –dice Galileo– di dover sollevare un gran peso avendo a disposizione una piccola forza. A prima vista, questo sembra impossibile; se però dividiamo il peso in tante parti, ognuna delle quali può essere sollevata dalla forza di cui disponiamo, ecco che quello che sembrava impossibile diventa facile. Quante volte facciamo proprio così senza accorgercene, quando dobbiamo portare al piano di sopra dell'acqua o dei mattoni?

Ma attenzione! quello che guadagniamo in forza lo ripaghiamo in cammino da fare. Mettiamo per esempio di dover sollevare di un metro un peso di 50 con una forza 10. Allora dovremo dividere il peso in 5 parti uguali e sollevarle una per volta. Alla fine, dopo cinque viaggi, per sollevare il peso di un metro ne abbiamo dovuti percorrere cinque: abbiamo usato una forza cinque volte più piccola del peso da sollevare, ma abbiamo percorso un cammino cinque volte più grande di quello del peso.

Ma se invece di mattoni dobbiamo sollevare un pianoforte, che non possiamo certo dividere in pezzi? qui entrano in gioco le macchine, la cui funzione è di permetterci di muovere il peso tutto insieme, senza romperlo. Sempre però mantenendo la stessa relazione tra peso e distanza: se con una macchina posso alzare un peso con una forza cinque volte minore, dovrò comunque percorrere uno spazio cinque volte maggiore. Le macchine che noi vedremo obbediscono tutte a questo principio.

2. La legge della leva.

La legge che regola l'equilibrio di due corpi appesi alle estremità di una leva è nota fin dall'antichità ed è stata dimostrata da Archimede, a cui viene anche attribuito il celebre detto "Datemi un punto d'appoggio, e io con una leva solleverò la Terra". La legge della leva si può enunciare in tanti modi diversi, ad esempio



Due pesi inversamente proporzionali alle distanze dal punto di sospensione sono in equilibrio.

Il mobile che apre la mostra, composto dai cinque poliedri regolari (i solidi platonici), illustra questa legge fondamentale.

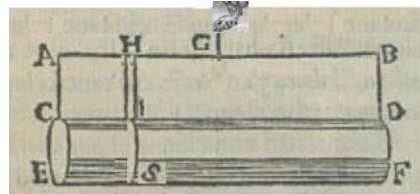
Galileo riprende e semplifica una delle dimostrazioni di Archimede; noi abbiamo costruito una macchina con la quale si può seguire passo passo la dimostrazione galileiana.

Si parte da un cilindro omogeneo CDEF appeso per gli estremi a una sbarra AB; se quest'ultima si sospende per il centro G, il sistema sarà in equilibrio.

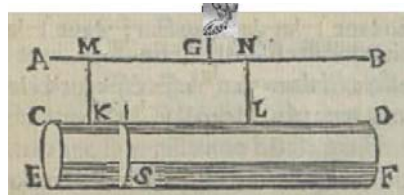
L'equilibrio obbedisce alla legge della leva



Tagliamo ora il cilindro in due parti diseguali lungo IS, e teniamo le parti nella posizione precedente mediante le cordicelle HI. Dato che tutti i pesi sono rimasti al loro posto, il sistema resterà in equilibrio.



A questo punto appendiamo i due cilindri CIES e IDSF per i loro centro mediante le cordicelle MK e NL, e tagliamo quelle che li sostenevano agli estremi. I due cilindri, essendo appesi per i loro centri, resteranno ai loro posti e dunque non cambierà nulla: il sistema rimarrà in equilibrio appeso per il punto G.



Fermiamoci ora a considerare la situazione. Abbiamo il cilindro CIES appeso al punto M, e il cilindro IDSF appeso al punto N. Le due distanze MG e GN sono uguali rispettivamente a KI e IL, cioè alla metà delle altezze CI e ID dei due cilindri. Queste altezze sono proporzionali ai pesi dei cilindri, e dunque in conclusione i pesi dei cilindri CIES e IDSF sono proporzionali alle distanze MG e GN. Questa è precisamente la legge della leva.

Premendo alternativamente i due pulsanti sul tavolo, il sistema passa dalla configurazione con i due cilindri appesi agli estremi a quella in cui sono appesi al centro, riproducendo i due passaggi chiave della dimostrazione. Il fatto che l'equilibrio si conservi conferma la validità della legge della leva.

Prima di proseguire ricordiamo che le leve possono essere di tre tipi: quelle di prima specie, in cui il punto d'appoggio, il fulcro, è al centro con la forza da una parte e la resistenza dall'altra; quelle di seconda specie in cui la resistenza è al centro e quelle di terza specie in cui al centro sta la forza. Potete vederne alcuni esempi sul tavolo vicino all'uscita.

3. L'altalena e la stadera.



Se ora vi girate, davanti a voi trovate un'altalena. Potete usarla (è abbastanza robusta anche per degli adulti), ma attenzione! non è un'altalena normale. Infatti girando la ruota al centro (bisogna contemporaneamente spingerla un po') i due bracci si allungano e si accorciano. In questo modo una persona più pesante può equilibrarne una più minuta, in accordo con la legge della leva. A dire il vero, chi si siede sul braccio più lungo è aiutato anche dal peso dell'altalena, che non è trascurabile.

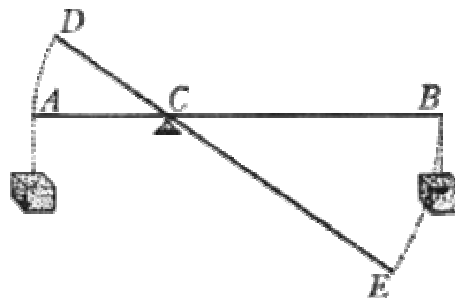
D'altra parte il rapporto delle lunghezze dei due bracci non può andare al di là di una certa quantità, e quindi nonostante l'aiuto dovuto al peso del braccio più lungo a volte non si riesce a porre l'altalena in equilibrio.



Accanto all'altalena sta uno degli strumenti più antichi il cui funzionamento si basa sulla legge della leva: la stadera. Lo strumento era noto e largamente usato dai Romani, e di ciò conserva ancora tracce linguistiche: il peso scorrevole si chiama *romano*, e in francese il termine *Romaine* (in spagnolo *Romana*, in portoghese *Balança romana*) indica la stadera nel suo complesso.

Il suo funzionamento è quello di una leva a bracci disuguali: al braccio più corto è appeso un piatto su cui si dispone la merce da pesare (che può anche eventualmente essere appesa all'uncino), mentre sul braccio più lungo c'è un peso scorrevole (il romano) che deve essere posizionato in modo da avere l'equilibrio. Una scala segnata sul braccio mostra direttamente il peso.

La leva mostra chiaramente il principio enunciato da Galileo. Mentre il peso pendente dal braccio corto AC percorre l'arco AD, la forza (che può essere un altro peso) che agisce sull'estremo del braccio lungo CB



percorre l'arco BE. Il rapporto tra gli spazi percorsi BE ed AD è uguale a quello dei rispettivi raggi CB ed AC:

$$BE : AD = CB : AC$$

e quest'ultimo, per la legge della leva, è uguale al rapporto tra il peso in A e quello in B. Il rapporto tra i pesi è dunque reciproco di quello degli spazi percorsi, in modo che un peso che sia ad esempio tre volte più piccolo farà un cammino tre volte più grande.

L'altalena a bracci regolabili

La stadera

4. L'argano.

La leva è uno strumento molto duttile ma a volte è piuttosto scomoda. Per esempio, come si può fare per sollevare un oggetto fino a una certa altezza utilizzando una leva? Si potrebbe legare il peso all'estremità di una fune e poi, posta la leva all'altezza in cui si vuole portare il peso, attaccarvi l'altro capo della fune e azionare la leva alzandolo finché si può. A questo punto, finita la corsa della leva, si dovrebbe appendere la fune da qualche parte in modo che il peso non scivoli indietro, poi riportare la leva nella posizione di partenza e ricominciare più e più volte, finché il peso non sia arrivato a destinazione.



Si vede bene che il processo sarebbe piuttosto macchinoso, senza parlare delle difficoltà di tener fermo il peso mentre si sposta la leva. Quello che occorrerebbe è una "leva continua", che si sposta via via che il peso si muove verso l'alto riportandosi sempre nella posizione iniziale. Questa leva continua è l'argano.

Nella leva normale l'asta gira descrivendo due circonferenze: una piccola con il braccio più corto (quello dove sta il peso), l'altra grande con il braccio più lungo, dove si applica la forza. Quando viene azionata, la leva gira cambiando posizione, e se si vuole impiegarla di nuovo bisogna riportarla indietro a vuoto, con i problemi che abbiamo visto. Nell'argano invece al posto dell'asta ci sono due ruote complete, una piccola dove è attaccato il peso e una grande sulla quale si fa forza per alzarlo. Rispetto alla leva ha la proprietà che non arriva mai a fine corsa; infatti è composto, per così dire, da infinite leve, una per ogni raggio della ruota, e ogni volta si usa quella nella posizione più adatta.

Nella macchina che vedete c'è un cilindro a cui è attaccato un sacco, e due ruote, una più grande e l'altra più piccola, con le quali si può sperimentare la differenza di forza necessaria per alzare il sacco. Infatti, come nel caso della leva, il rapporto tra il peso e la forza è uguale a quello tra il raggio della ruota e quello del cilindro, che sono i bracci di una delle infinite leve che compongono l'argano.

Anche per l'argano vale il principio di Galileo. Infatti quando la ruota fa un giro, il peso si alza di uno spazio uguale alla circonferenza del cilindro, mentre la forza si sposta di un giro sulla ruota percorrendo uno spazio pari alla sua circonferenza. Il rapporto tra queste due circonferenze è uguale a quello dei loro raggi, e questo è l'inverso del rapporto dei pesi. In conclusione, se il raggio della ruota è otto volte quello del cilindro occorrerà una forza otto volte minore del peso, ma questa percorrerà uno spazio otto volte più grande.

5. Le carrucole.

Subito dopo l'argano si trova una grande installazione con tre sistemi di carrucole, ognuno dei quali serve per sollevare un sacco. Tutti i sacchi hanno lo stesso peso, ma lo sforzo necessario per sollevarli decresce via

via che si passa da una sola carrucola a sistemi più articolati.

Una carrucola è una specie di argano, in cui il peso e la forza agiscono sulla stessa circonferenza, e quindi sono sempre appesi a una leva a bracci uguali. Questo ha due conseguenze: primo, che il raggio della carrucola non ha alcuna influenza sul suo funzionamento, e secondo, che con una sola carrucola la forza necessaria per sollevare il sacco è pari al peso di questo. Ma allora –chiederete– a che serve usare uno strumento? La risposta, ci dice Galileo, ha a che fare con la seconda utilità che si ricava dalle macchine, ed è la maggiore comodità nell'applicazione della forza. Infatti chi volesse tirare su il sacco (o un secchio da un pozzo) a forza di braccia dovrebbe fare non poca fatica perché da una parte l'operazione è scomoda e dall'altra dovrà vincere oltre che il peso da sollevare anche quello delle proprie braccia. Al contrario, se si fa passare la corda in una carrucola fissata a una trave e si tira verso il basso, l'operazione riesce più agevole e ci si può aiutare con la gravità non solo delle braccia ma di tutto il corpo. Ci sono però delle limitazioni: che mentre un tipo molto forzuto può sollevare a forza di braccia un peso molto grande, con la carrucola si può sollevare al massimo un peso pari a quello di chi tira. Se si cerca di sollevare un peso maggiore del proprio invece di alzare quello ci si arrampica sulla fune. A meno di non ancorare i piedi al pavimento, ad esempio incollando le scarpe a terra.



Invece con sistemi di carrucole come quelli esposti lo stesso peso può essere sollevato da una forza più piccola. Quanto più piccola? La risposta viene direttamente dal principio di Galileo.

Cominciamo da una sola carrucola. Qui tanta corda si tira, di tanto sale il sacco. Il principio di Galileo ci dice allora che le due forze, il peso del sacco e quella di chi tira, devono essere anche loro uguali.

Nel sistema di centro il sacco è tirato da due corde, una che sale e una che scende. Quando tiro di un metro, ognuna di queste due corde si accorcia di mezzo metro e di tanto sale il sacco. A cammino doppio corrisponde forza metà, e dunque possiamo tirare su il sacco con una forza pari a metà del suo peso. Infine il sistema più complesso ha quattro corde che reggono il sacco: tirando quattro metri di corda il sacco sale di uno. Per il principio di Galileo, basterà allora una forza pari a un quarto del peso del sacco.



Poco più avanti si vede una bicicletta sollevata da terra per mezzo di un sistema di carrucole. È un kit che si trova in commercio e che serve per alzare al soffitto la bicicletta quando non la si usa in modo che non prenda posto e intralci il passaggio.

Siccome la bici non è ancorata e oscilla, si prega di non toccarla. Invece potete provare a calcolare quanta forza occorre per sollevarla da terra. Osserviamo che quando si tira ci sono quattro fili che si accorciano e sollevano la bici. E allora?

Diversi sistemi di carrucole alzano lo stesso peso con forze diverse

Un sistema di carrucole per sollevare una bicicletta

Allora si può invocare il principio di Galileo e dire: siccome mi muovo

quattro volte di più, ho bisogno di un quarto della forza.

Avevate risposto così? Bene, possiamo proseguire. No? pazienza, andiamo avanti lo stesso.

6. Il piano inclinato.

Uno strumento utilissimo per sollevare pesi è il piano inclinato. Si tratta di uno strumento semplicissimo, al punto che sembra troppo anche chiamarlo strumento, come non chiameremmo strumento un sasso o un tronco d'albero, ma è proprio per questa sua semplicità che lo usiamo in moltissime occasioni senza nemmeno accorgercene.



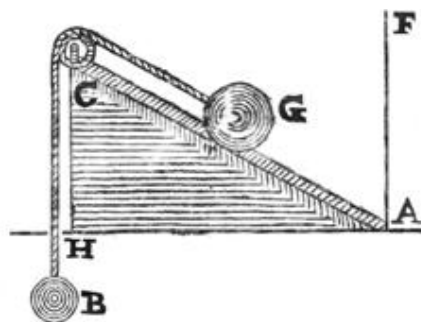
Scalare una montagna in parete non è certo un affare di tutti i giorni, ma se c'è una strada che ci porta su tutti ci possono arrivare, anche se non hanno un'automobile. La strada è un piano inclinato. Senza il quale non ci sarebbero auto, perché non potrebbero superare nemmeno il minimo dislivello, nemmeno uno scalino. Che invece con un piano inclinato non dà nessun problema, come illustra la macchina di Paperino che per l'occasione ha un guidatore d'eccezione.

Sempre parlando di macchine, per caricarle su un autotreno (una cicogna, come si dice) occorrerebbe una gru se non ci venissero in aiuto due semplicissimi piani inclinati lungo i quali una macchina può salire comodamente da sola.

Andando poi indietro nel tempo, alcuni studiosi hanno suggerito che per portare gli enormi massi necessari per costruire le piramidi gli antichi Egizi si servissero di un enorme piano inclinato realizzato con una montagna di terra che poi a costruzione ultimata sarebbe stata rimossa.

Tutto ciò perché anche il piano inclinato può servire per diminuire la forza necessaria per spostare un dato peso.

A prima vista sembrerebbe che questo fatto, che sperimentiamo tutti i giorni, contraddica il principio di Galileo.



Infatti quando il peso B scende di un metro anche il peso G sul piano si sposta di un metro, e quindi sembrerebbe che il piano inclinato non porti nessun vantaggio e che per sollevare G ci voglia un peso (o una forza) uguale.

Un piano inclinato fa superare un gradino

In realtà sappiamo benissimo che non è così, e che a sollevare un peso in verticale si fa molta più fatica che mettendolo su un carrello e portandolo in salita. Anzi, più la salita è dolce meno si fa fatica, come sa chiunque vada in bicicletta.

Galileo ci dice come fare per sciogliere questo paradosso. Negli strumenti che abbiamo considerato finora, sia i pesi che le forze si muovevano sempre in direzione verticale. Qui invece il peso B va verticalmente, mentre G si muove obliquamente sul piano inclinato AC. Quando G ha percorso tutto il piano da A a C, si è mosso verticalmente per uno spazio uguale ad HC e ha percorso orizzontalmente uno spazio pari ad AH. Ora il movimento orizzontale ha bisogno di una forza minima.



Come, direte voi, non ha mai provato a spingere orizzontalmente un baule? Altro che forza minima, non si riesce nemmeno a spostarlo di un millimetro. Certo, ma questo dipende dall'attrito che il baule fa in terra; se si mette su un carrello a ruote, l'attrito diminuisce sensibilmente e con lui la forza necessaria. Se poi si diminuisce ulteriormente l'attrito, ad esempio se si mette il baule sul ghiaccio, basta spingerlo con un dito e parte. E grandissime navi possono essere trascinate dai rimorchiatori, che non potrebbero certo trascinarle a terra.

Ma torniamo al piano inclinato. Il movimento orizzontale, ci dice Galileo, ha bisogno di una forza minima, e quindi quando il peso si sposta obliquamente, bisogna tener conto solo dello spostamento verticale.



Ora sì che i conti tornano. Infatti il peso B si muove verticalmente, e quindi il suo spostamento verticale è pari a tutta la lunghezza AC del piano inclinato. Invece il peso G si sposta diagonalmente, e il suo spostamento verticale è solo l'altezza HC del piano. Di conseguenza la forza che occorre per spostarlo è una frazione del peso pari al rapporto tra HC e AC. Ad esempio se il piano è inclinato di 30° , cioè se l'angolo CAH è di 30° , l'altezza HC è la metà di AC e dunque occorre una forza pari alla metà del peso.

Per chi sa un po' di trigonometria, diremo che il rapporto tra la forza e il peso da sollevare è il seno dell'angolo CAH che dà l'inclinazione del piano.

Si può verificare questa relazione con il piano inclinato azionato elettricamente. Andando su e giù con il joystick si può variare l'inclinazione; il peso G è di 5 chili, un dinamometro sostituisce il peso B e mostra la forza necessaria per tenerlo in equilibrio. Sul fondo, i segni danno la stessa forza calcolata con il principio di Galileo. Si noterà che le variazioni di un chilo corrispondono a segni che sono ugualmente spazati verticalmente, mentre le variazioni angolari sono diverse e aumentano via via che il piano si avvicina alla verticale.

Un piano inclinato azionato elettricamente

L'orologio si carica scendendo lungo un piano inclinato

Sul tavolo vicino troverete uno stranissimo orologio, che si carica

scendendo lungo un piano inclinato. Non è molto comodo, perché ogni tanto bisogna rimetterlo su, se no si ferma. Per questo forse non ha avuto molto successo e non si trova in commercio.

7. La vite.

Se prendiamo un piano inclinato e lo arrotoliamo intorno a un cilindro, ecco costruita una vite.



La pendenza del piano determina il passo della vite: più la pendenza del piano è piccola, più piccolo è il passo e maggiore il numero di giri che bisogna fare per avanzare di un centimetro.



Di conseguenza, con una piccola forza possiamo vincere una grande resistenza, e viceversa basta una piccola resistenza per resistere a una forza molto grande. Nelle viti a punta possiamo far penetrare la vite nel legno girando un cacciavite con la sola forza della mano, cosa che non riusciremmo mai a fare con un chiodo che penetra direttamente. In quelle con un dado, una volta strette il solo attrito è sufficiente per tenere i pezzi congiunti anche se si cerca di separarli a forza.



Dalla combinazione di una vite con un argano nascono vari strumenti che possono essere usati nelle attività più diverse: dai cavatappi alle presse per l'uva, dalla legatura dei libri agli schiaccianoci. Su un tavolo si può vedere una pressa per legatore in legno della prima metà del Novecento.

8. La vite di Archimede.

Supponiamo di camminare lungo le spire di una grande vite disposta in posizione verticale: cominciando da terra saliremo sempre con la stessa pendenza fino ad arrivare in cima. Se ora incliniamo l'asse della vite, la pendenza varierà: in certe parti sarà aumentata, in altre diminuirà e per qualche tratto potremo anche andare in discesa.

Mettiamo ora la vite in un tubo di plastica, in modo da renderla a tenuta, e versiamoci dell'acqua. Se la vite è verticale, l'acqua scorrerà lungo le spire e si raccoglierà in basso; se invece è inclinata in modo che alcune parti delle spire siano in discesa, l'acqua si raccoglierà nei punti più bassi senza cadere fino in fondo, perché per farlo dovrebbe salire.

Supponiamo ora di andare al contrario, cioè di immergere la vite in una bacinella d'acqua e di farla ruotare attorno al suo asse. Se questo è verticale, l'acqua verrà agitata ma resterà nella bacinella, perché per penetrare nella vite dovrebbe salire. Se però l'asse è abbastanza inclinato, ci sono sempre delle parti della vite che sono in discesa, e l'acqua scorrerà continuamente lungo di esse percorrendo tutte le spire fino a uscire dall'alto.

Una vite a legno

Un bullone

Una pressa da legatoria

Abbiamo così costruito la vite di Archimede, un meccanismo usato fin



dall'antichità per alzare acqua. Dato che il pescaggio richiesto è minimo, la vite è particolarmente adatta per svuotare acque basse. Ad esempio veniva usata nelle navi per svuotare le stive delle navi e le miniere.

Oggi la vite di Archimede trova applicazioni nei campi più svariati: essa serve per innalzare granaglie e immagazzinarle nei silos, per trasportare i fanghi degli impianti di depurazione delle acque, per recuperare scarti di lavorazione delle officine.

Nella nostra vite, invece di una copertura a tenuta, i bordi delle spire sono rialzati in modo da formare un canale per trattenere l'acqua. Non giratela troppo velocemente per evitare di spruzzarvi e di bagnare in terra.

A questo punto la nostra visita alle macchine di Galileo è terminata. Sul tavolo vicino all'uscita troverete un certo numero di oggetti usati quotidianamente, il cui funzionamento dipende da una o dall'altra delle macchine che abbiamo incontrato. Sapete riconoscerle? Potete controllare la vostra risposta sul computer. Buon divertimento

La vite di Archimede