

Ricostruzione della balista imperiale Romana

un piacevole viaggio fra fantasia, storia, tecnologia e ...
progettazione.

Pier Gabriele Molari (*)

Guido Angelini (*)

Andreas Canzler (**)

Pietro Sannipoli (*)

(*) Università di Bologna

(**) Chemnitz University of Technology (D)

Riassunto

Nel secondo anno, da quando è stato acceso il "Laboratorio di storia dell'ingegneria meccanica", si prosegue il cammino iniziato nel Corso precedente, che ha portato alla ricostruzione virtuale della balista descritta da Vitruvio [1] e ci si impegna in una ricostruzione della macchina da lancio dei romani dell'età imperiale.

Si è così coinvolti in un piacevole viaggio, a cavallo fra fantasia interpretativa e costruttiva, ricerca storica e realtà tecnologica che, definita la "mission" della macchina, fa comprendere l'essenza del progetto.

L'analisi accurata delle immagini presenti sulla colonna Traiana fornisce un terreno di discussione e di elaborazione di varie soluzioni costruttive che vengono esaminate e confrontate scoprendo anche inedite interpretazioni delle scene rappresentate. Il lavoro termina con lo "studio" della macchina, i disegni dei particolari e del complessivo.

In attesa di una ri-costruzione reale della macchina se ne esegue una virtuale con tanto di lancio .. simulato.

Premessa

Dopo aver fugato i dubbi sollevati da molti sul fatto che Vitruvio avesse le conoscenze sufficienti per essere un costruttore di macchine belliche¹, ci si rende conto come questa macchina Fig.1 fosse particolarmente pesante,

¹ la precisa esperienza professionale dell'autore, viene dichiarata nella prefazione [2] I,2: (...) *itaque cum M. Aurelio et P. Minidio et Gn. Cornelio ad apparationem ballistarum et scorpionum reliquorumque tormentorum refectionem fui praesto et cum eis commoda accepi (...)* «Pertanto attesi insieme con M. Aurelio e P. Minidio e Gn. Cornelio alla preparazione delle baliste e degli scorpioni e al riattamento delle macchine belliche; e insieme con essi ricevetti il compenso» (traduzione di Silvio Ferri).

delicata nella messa a punto e dispendiosa nella sostituzione dei pezzi; in sostanza, poco adatta ad essere impiegata sul campo da un esercito che aveva fatto della mobilità una strategia essenziale [A1÷A4], ci si imbatte così nella minuziosa descrizione della balista eseguita da Erone² e affascinati dalla rivoluzione tecnologica di questa macchina rispetto alle precedenti, ci si impegna nella ricerca bibliografica per porre le basi necessarie ad una sua (ri)costruzione.

A differenza della balista "classica" con struttura lignea di notevoli dimensioni, ritrovata ad Hatra e sostanzialmente descritta da Vitruvio, questa balista con telaio metallico viene detta piccola, potente e maneggevole [4].



Figura 1. La ricostruzione della balista di Vitruvio [1]

² Durante il Corso sono stati messi in evidenza i legami fra la tradizione neoAristotelica-Alessandrina, rappresentata da Archimede, Erone, Pappo, e nostri uomini di scienza: Commandino, Dal Monte, Galilei, legami che hanno contribuito in maniera così profonda alla impostazione della scienza moderna [3].

Si trova poi che la balista descritta da Erone ha acceso la curiosità di molti Studiosi [5, 6, 7, 8] e che vanta alcune ricostruzioni, alcune delle quali sperimentate sul campo.

Meno interesse ha suscitato la balista Romana derivata da quella descritta da Erone ampiamente e meticolosamente descritta sulla colonna Traiana, colonna che fu inaugurata il 12 maggio 113 e che riporta le guerre avvenute in Dacia fra il 101 ed il 106. Marco Ulpio Nerva Traiano fu imperatore romano dal 98 al 117 e sotto il suo comando l'impero romano raggiunse la sua massima espansione. Anche la descrizione di Ammiano Marcellino pur ammirando lo spirito di voler far conoscere questa macchina nei dettagli, non è di grande aiuto soprattutto perché la macchina viene descritta, come scrive l'Autore "nei limiti che me lo concede il mio ingegno modesto" [A2].

Molte domande sulla struttura di questa balista vengono poste in [7]. Sembra quindi più interessante spostare lo studio per tentare una ricostruzione di questa balista, dato che si può enfatizzare il ruolo della estrema semplificazione e della concretezza Romana, tanto utile da mettere in luce nella didattica della moderna progettazione delle macchine.

Vincoli strategici e tattici per la balista di Erone rivisitata dai Romani

Come descritto in [9] agli inizi del II secolo *l'esercito romano si trovò ad essere assistito dal più potente arsenale di macchine da guerra dell'antichità: l'adozione su larga scala delle carballiste montate su carri trainati conferiva una flessibilità ed una efficacia di impiego paragonabile a quella delle moderne artiglierie mobili...*



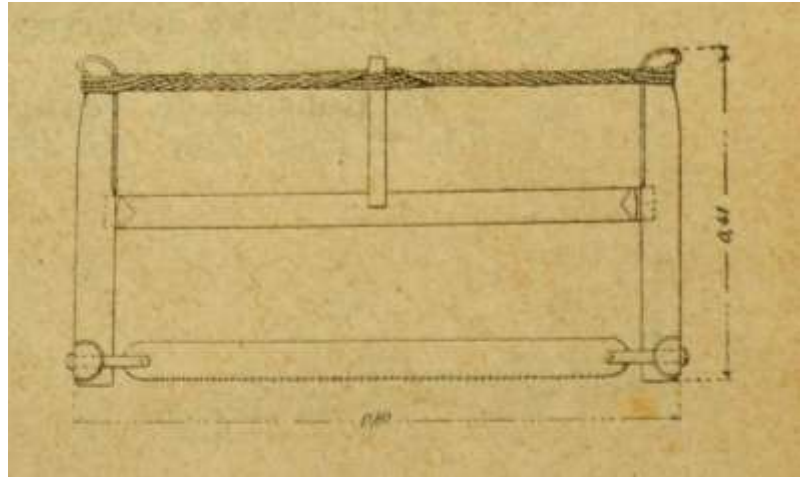


Figura 2. a- un tornio parallelo del 1395 [11], b- un vecchio trapano a mano, c- una classica sega per il legno [12].

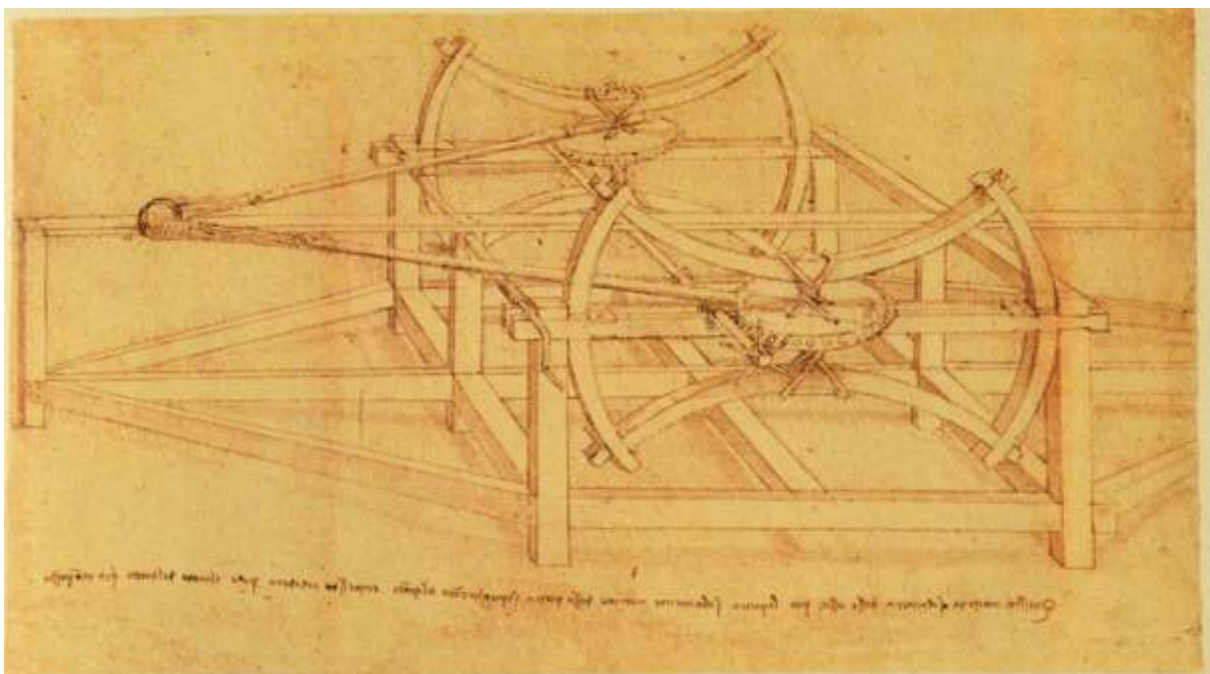


Figura 3. La balista di Leonardo, Codice Atlantico, Foglio 145 r [13]

raccomanda che lo schieramento delle macchine da guerra avvenga in parte sulle ali avanzate della formazione, in modo da colpire dalla massima distanza possibile, e in parte dietro alla prima linea per sostenerla prima dell'impiego delle fanterie, assieme agli arcieri e ai lanciatori di giavellotto. La macchina quindi deve venire prodotta su larga scala

Va notato poi che la vita di queste macchine è limitata fra il primo ed il quarto secolo. Dopo tale periodo cessa la necessità di disporre di un esercito estremamente mobile e le baliste non appaiono più nei bassorilievi che celebrano le imprese di Costantino, ma vengono ancora descritte [A2÷A4]. Queste macchine dette "macchine a torsione" *non saranno superate nel corso dell'antichità se non con la rivoluzionaria invenzione della polvere da sparo.*[10]

Le macchine "a torsione"

Sono note alcune macchine che impiegavano l'avvolgimento di una fune in un tamburo per poi svolgere successivamente la fune e generare un moto rotatorio di un asse. Purtroppo disponiamo di immagini di epoche successive, ma vengono riportate perché si pensa siano significative. Le macchine semplici e primordiali riportate in Fig. 2 sembrano essere state le ispiratrici delle macchine belliche a torsione, anche se con modalità che possono discostarsi sensibilmente da ciò che si sta studiando.

Un esempio tipico è quello del tornio parallelo sul quale si avvolgeva e svolgeva una fune o un nastro collegato ad un elemento elastico. L'energia necessaria per il moto veniva fornita dall'operatore agendo su di un pedale Fig. 2-a [10].

Si riportano anche macchine nelle quali, anche se con modalità diverse dalla precedente, veniva impiegato o l'avvolgimento di una funicella (come nel trapano che sfrutta il moto di sali-scendi di una traversa mossa dalla mano dell'operatore) Fig.2-b o la torsione di una treccia di fili per generare forze assiali (come nelle classiche seghe da legno) Fig. 2-c [12] e come in Leonardo per deformare a flessione elementi elastici³, Fig. 3 [13].

La Fig. 3 è significativa del fatto che anche Leonardo non progettasse più baliste con un "motore a torsione". Questa tipologia di macchine viene invece riportata da Valturio Fig. 4 ma, in questo caso, come già visto in [1], sembra lecito pensare che vi sia un legame diretto con l'opera di Frontino (30 - 103). e quindi le immagini di Valturio si possono pensare versioni precedenti delle nostre baliste imperiali.

La struttura della balista di Erone e della balista romana

Ritornando alla balista minuziosamente descritta da Erone e ricostruita modernamente da Marsden [5], Iriarte[6] e da Russo [7], essa è formata da un telaio metallico al quale vengono ancorati i due elementi elastici precaricati

³ *Questa macchina scaccerà da sé assai più la pietra, se l'antenne motrice d'essa pietra si piegheranno alquanto. E questo accaderà perché il moto del tutto fa composto.* Leonardo, Codice Atlantico, foglio 145 r [13]

attraverso il sistema dei modioli e della ralla con l'impiego di un nonio per il precarico ed il fissaggio [15] [1].



Figura 4. La balista di Valturio , *De Re Militari* - manoscritto (22 es. codice D, f. 139 v.) 1450 circa, per maggiori dettagli si veda [14].

La balista è molto ben rappresentata nei tre disegni riportati e non sembra necessaria un'ulteriore descrizione Fig. 5 -a, -b, -c.

In queste macchine si notano alcuni particolari ai quali si farà riferimento in seguito e che vale la pena nominare (nei termini greci o latini o latino-italianizzati) [5] [7] [8]:

la tipologia:

elitona: una balista nella quale i bracci ruotano verso l'esterno per espellere il proietto, Fig. 6-a,

palintona: una balista nella quale i bracci ruotano all'interno per espellere il proietto, Fig. 6-b.

la struttura della macchina vera e propria:

kambestrion (capitulum): i due montanti che racchiudono la matassa e sostengono i modioli

kamarion: la traversa superiore, in genere arcuata,

klimakion: la traversa inferiore o telaio

modioli: le ralle indexate che permettono di precaricare la matassa e di fermarla con spine nella posizione desiderata [15] Fig. 7.

braccetti (bracchium): i bracci che ruotando portano energia al porta sasso tramite due fili.

chelonium : guida per la slitta alla quale erano fissati tramite un meccanismo a scatto i fili del portasasso.

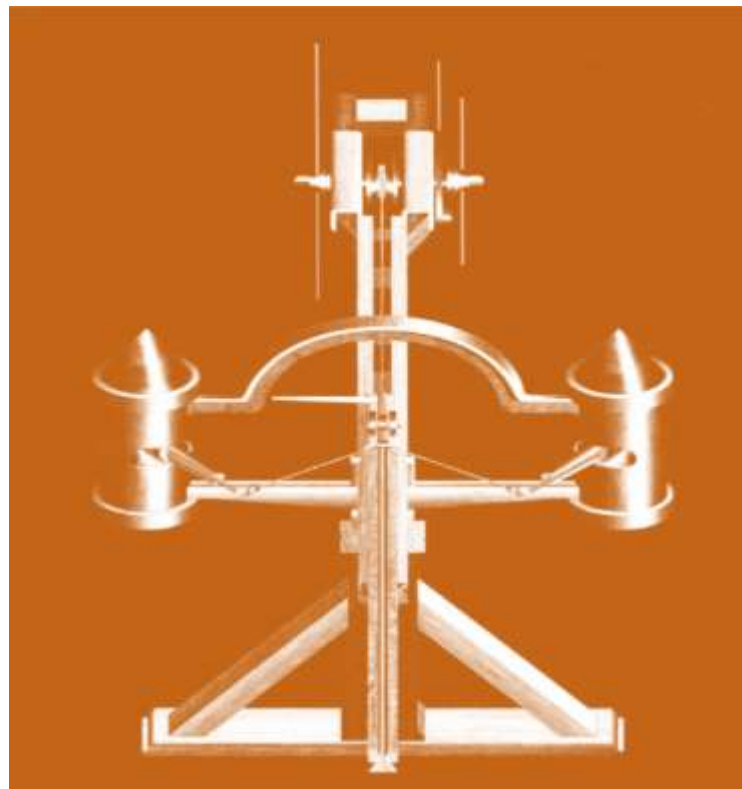
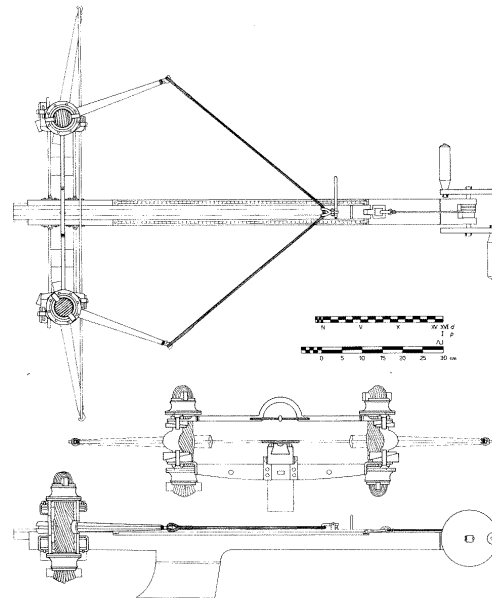


Figura 5. Alcune ricostruzioni della balista di Erone, a- Marsden 1969 [5], b- Iriarte 2000 [6], c- Russo 2004 [7]

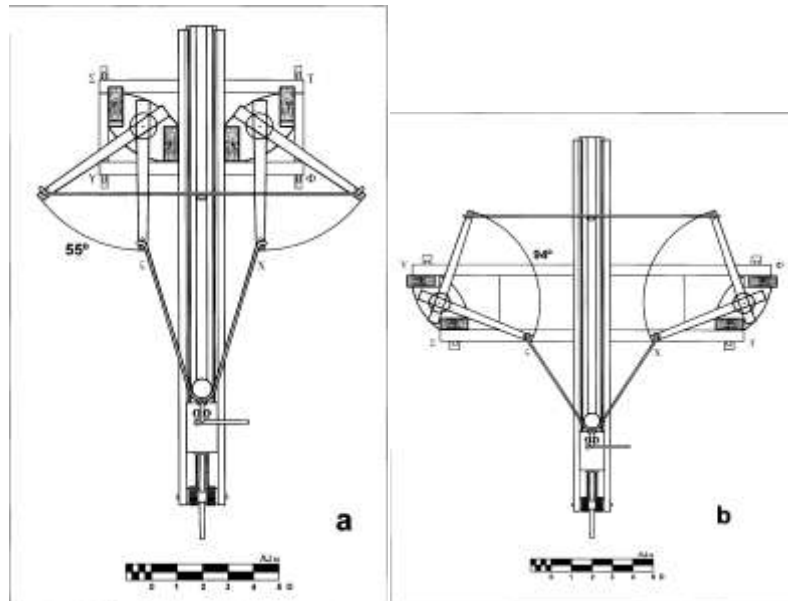


Figura 6. Le due tipologie di macchina: a- la elitona, b- la palintona [16]

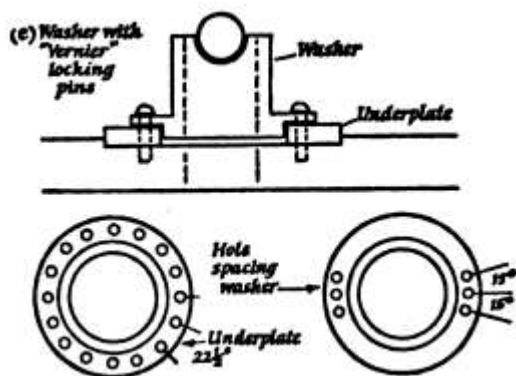


Figura 7. Il modiolus: la ralla indexata con nonio per frazionare la divisione angolare e quindi ottimizzare il precarico della matassa [14] e un modiolus originale ritrovato a Cremona (Museo Civico) [7] [10].

la struttura di sostegno:

basis: le traverse di piede

columella: il ritto unito al sostegno centrale che poteva essere alzato o abbassato

caput columellae: l'articolazione superiore della columella

columna minor posterior: il sostegno posteriore per il chelonium, che definiva l'alzo.

capreolus: la controventatura della colonna centrale (plinto)

plinthos: la parte del telaio, centrale e di sostegno

subiectio: il controvento posteriore sul quale veniva regolata la columna minor per regolare l'alzo.

Le immagini sulla Colonna Traiana [17]



Figura 8. Immagini dalla Colonna Traiana, XL - 104-105



Figura 9. Immagini dalla Colonna Traiana, LXV - 163-164



Figura 10. Immagini di baliste per difesa fissa,
Colonna Traiana LXVI 165-166



Figura 11. Baliste, frombolieri e proiettili. Immagini dalla
Colonna Traiana, LXVI - 167



Figura 12. Ingegneri imperiali osservano la nuova balista, Colonna Traiana, LXVI 169

Dalla Fig. 8 alla 12 vengono riportate le scene della colonna Traiana nelle quali sono scolpite baliste. Non si può contare su descrizioni scritte della balista della Roma imperiale, se non quella "tarda" di Ammiano Marcellino [A2], ma le immagini riportate ci permettono di osservare questa macchina, anche in condizioni operative, e di confrontarle con quelle della balista descritta da Erone. Nascono così spontanee molte domande sulle caratteristiche meccaniche della macchina. Alcune di esse sono poste in [7, pag.280], dove vengono date anche alcune risposte, qui vengono ampliate, analizzate e discusse.

Le domande:

Perché le matasse elastiche sono racchiuse in astucci cilindrici?

Questi astucci sono soltanto una protezione per le matasse elastiche?

Essi fanno parte integrante della struttura di sostegno della matassa?

Nel caso fosse rimasta la struttura portante all'interno dei cilindri quale poteva la procedura di montaggio ?

Perché è molto più ampia la barra di accoppiamento fra i due "motori"?

Perché questa barra è priva della parte rettilinea?

Perché i due cilindri sono così poco sviluppati in altezza?

Esiste una ferritoia centrale nella quale possono scorrere i braccetti ?

Nelle, sostanzialmente due, installazioni: statica da difesa sulle mura, mobile sui carri a latere della cavalleria o centrale dietro la prima linea, il basamento è sempre lo stesso ?

Ma ancora:

perché i due cilindri non sempre terminano con due chiusure a punta?

In quale ambiente sono poste e cosa fanno le persone che le circondano?

Discussione sulle idee di base e alcune convinzioni

Durante il Corso si discute molto su questi interrogativi, anche su immagini ingrandite, e sul significato delle immagini riportate sulla Colonna. In sintesi, liberando la fantasia, si arriva a sostenere che i Romani apportano a questa macchina bellica sostanziali modifiche, oggi si direbbe, ne fanno una "industrializzazione". Vediamone in sintesi i dettagli:

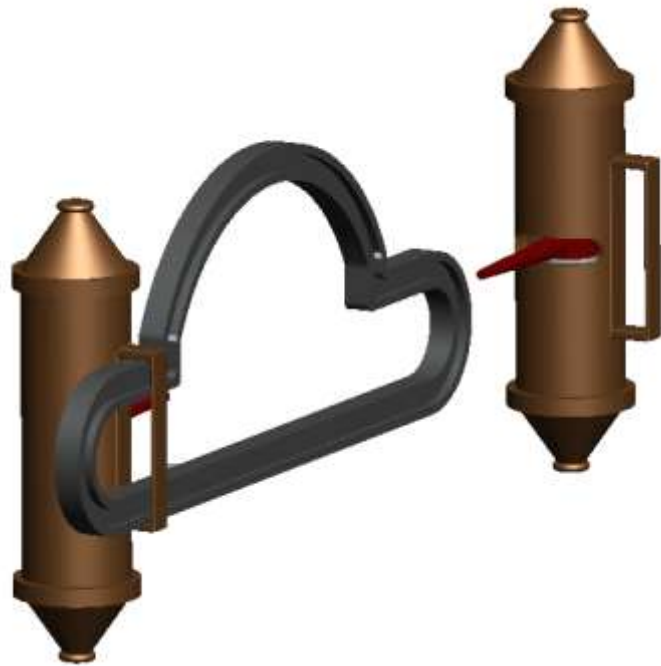


Figura 13. Un *balistario* con il "motore" di riserva a tracolla e a destra un possibile schema di questa versione della macchina (vista da dietro), con un "motore" in posizione ed uno separato.

Gli ingegneri imperiali separano la parte soggetta a torsione dalla parte soggetta a flessione; inscatolano la matassa elastica e la rendono sostituibile in tempi rapidi (quasi un cambio gomme da F1 !!). Il progetto viene così stravolto. La matassa da elemento cardine di difficilissima messa a punto (di difficile tuning!! direbbe oggi Vitruvio, che descrive l'operazione in modo dettagliato⁴) diviene una cartuccia da sostituire: l'addetto alla macchina

⁴ *Altrettanto importante è la sua formazione musicale relativa alla teoria armonica e al rapporto tonale, che gli consente, fra le altre cose, di calibrare con precisione baliste catapulte e scorpioni. Infatti nei bracci trasversali di queste macchine, alle loro estremità di destra e di sinistra, vi sono dei fori detti semitoni, attraverso i quali si tendono, per mezzo di verricelli e leve, le funi di budello ritorto che non vengono fissate e serrate definitivamente se prima non emettono un determinato suono che all'orecchio dell'artefice risulti della stessa intensità armonica. Perché il colpo parta e segua una traiettoria in linea retta la*

(Colonna Traiana XL 104) ne porta a tracolla un refill Fig. 13⁵ !! Va anche considerato che questa tecnologia, impiegante nervi e peli animali, era estremamente delicata e poteva aver bisogno di sostituzioni impreviste. Vegezio [A3] racconta una disperata "colletta" di capelli femminili.

I Romani impiegano elementi metallici anche nella matassa elastica e ne evitano il precaricamento in una configurazione palintona, cioè con la rotazione dei braccetti verso l'interno della macchina dopo lo sgancio, più sicura per gli addetti e di ingombro ridotto. Accorciano la matassa ed evitano anche la messa a punto. Ma c'è di più, nella colonna Traiana viene anche riportato un prototipo di un ulteriore *step* (sempre per utilizzare un termine da F1): viene tolta anche la traversa superiore e così il telaio viene ulteriormente semplificato Fig.11.



Figura 14. Il busto di Apollodoro di Damasco (gipsoteca di Monaco), architetto di Traiano e autore della famosa "colonna" [18], a destra "gli ingegneri" imperiali o un autoritratto dello stesso Apollodoro ?

In sostanza nella Colonna Traiana vengono riportati tre *step* della macchina, una prima con gli elementi elastici racchiusi in cartucce intercambiabili e con la registrazione da entrambi i lati (Colonna Traiana XL 104-105) Fig.8, un secondo *step* con la cartuccia che non viene più regolata ma che si monta dall'alto e viene bloccata da un coperchio (Colonna Traiana LXV 163-164) Fig.9. Una terza soluzione che spoglia definitivamente la macchina di tutte le cose inutili e che vede i due elementi cilindrici spuntare a sbalzo da un

tensione dei bracci dev'essere di pari intensità e quando essa viene allentata bisogna che scattino all'unisono. Vitruvio I,8 [2].

⁵ E' con grande piacere che si ha una conferma di questa osservazione dal lavoro [10]

sottostante telaio che li sostiene Fig.11⁶. Piace qui pesare che questa versione venga osservata con compiacimento da coloro che l'hanno pensata⁷: dagli ingegneri di Traiano (Colonna Traiana LXVI 169) Fig.12 e quindi nasce spontaneo pensare che sia lo stesso Apollodoro di Damasco [19], architetto imperiale, autore della colonna, la cui somiglianza appare molto marcata per entrambe le persone, Fig.14 ad osservare compiaciuto la sua opera.

Si decide di concentrarsi sostanzialmente su questa terza versione della macchina perché sembra rappresentare la massima evoluzione della macchina stessa.

Evoluzione del progetto concettuale: tipologie di riferimento

Ma rimane ancora la domanda di base: a questi tre *step* come si adeguano gli elementi "motori" ?

Aprondo la fantasia, tenendo presente i vincoli tecnologici e facendo riferimento ove è possibile anche a soluzioni moderne, si possono pensare ben sei differenti tipi di "cartucce motore":

1- Fili raggruppati in una matassa e avvolta su aspo.

Raggruppando i fili e incrociandoli come la filatrice fa su di un aspo nel confezionamento della matassa, si può, come si vede nello schizzo, effettuare il caricamento solo da un lato del cilindro, fissando su scassi assiali le estremità dei bracci dell'aspo e lasciando un sostegno assiale per un cuscinetto al quale viene ancorato il braccetto Fig. 15.



Figura 15. Dal gomitollo alla matassa: un aspo con il filo avvolto. Di facile messa a punto rispetto alla matassa originale, e con possibilità di sostituzione rapida.

⁶ Non è chiaro se l'interruzione dell'arco del kamarion sia una lesione del fregio o sia una rappresentazione di una nuova versione della macchina. Qui fa piacere optare per questa seconda interpretazione e si pensa ad un telaio realizzato in un sol pezzo per fusione in bronzo; una struttura più "classica" con due traverse in ferro non altera tuttavia lo sviluppo del lavoro.

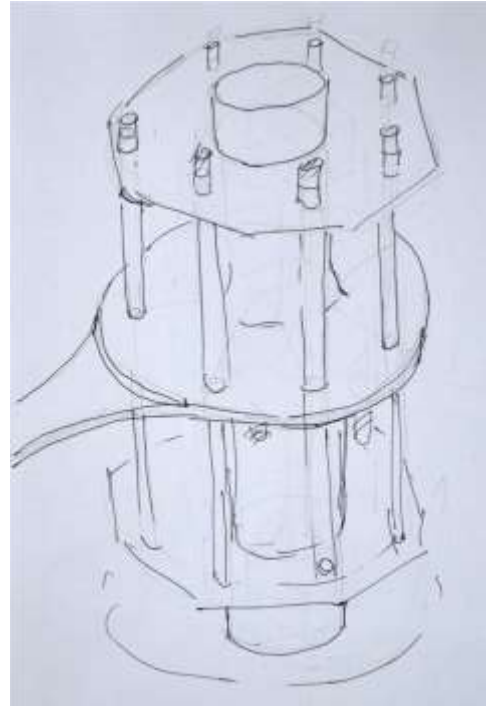
⁷ Ciò a differenza di quanto viene asserito dagli studiosi che affermano trattarsi di Daci [10].

2- Fili multipli fra loro separati

Come nelle fruste per montare l'albume dell'uovo, si possono vedere i fili



Figura 16. Il distanziatore dei fili (come in una frusta per montare l'albume delle uova) che diviene elemento mobile.



ancorati a due piatti d'estremità e passanti su di un distanziale centrale tenuto assialmente da un cuscinetto su di un albero centrale pure fisso alle piastre d'estremità.

Il braccetto può venire ancorato con un accoppiamento filettato al piatto centrale Fig. 16.

In questo caso il filo lavora a trazione e la sua deformazione viene valutata sull'allungamento dalla posizione iniziale alla finale, in modo del tutto analogo a quanto fatto nel precedente lavoro [1].

3- Molle a lamine (balestre) in parallelo

Si impiegano lamierini disposti in parallelo Fig. 17.

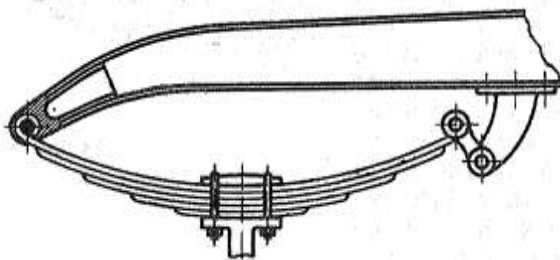
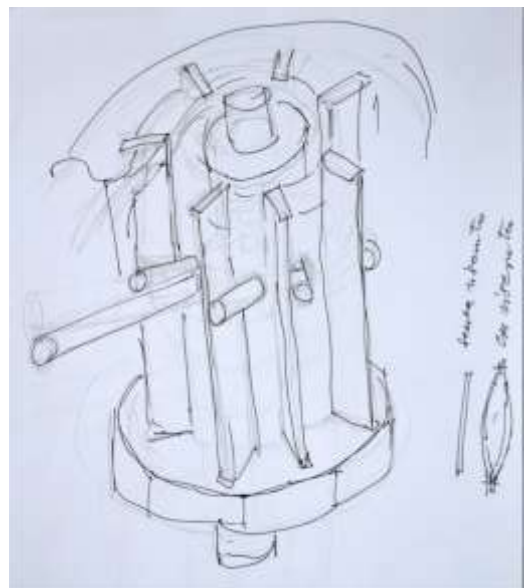


Figura 17. Una molla a balestra e un insieme di molle a balestra in parallelo



Il modello può impiegare anche lamierini affacciati a due a due come nella macchina descritta in [4] e riferita ad altro Autore.

4- Barra di torsione

La barra di torsione è presente in molte sospensioni di vetture automobilistiche e immagazzina energia in spazi contenuti, riuscendo a migliorare il comportamento dinamico della vettura in presenza di asperità stradali.

Si tratta sostanzialmente di una barra con le estremità ammorsate al telaio ed una parte centrale soggetta alla coppia esterna di torsione Fig. 18.

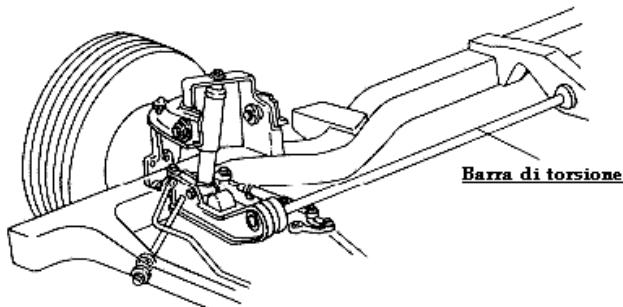
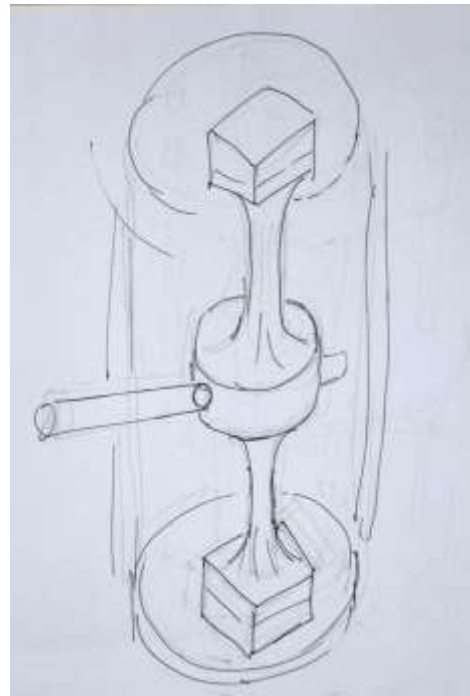


Figura 18. Una barra di torsione montata su veicolo e lo schema della possibilità di utilizzare lo stesso principio sulla balista.



Per il montaggio all'interno dei nostri cilindri, si pensa che la parte centrale sia sostenuta assialmente da un cuscinetto e che possa permettere il passaggio delle due teste Fig. 18.

5- Molle di torsione

Le molle cilindriche di torsione ad elica: queste molle sono simili alle più tradizionali molle cilindriche di compressione. Presentano estremità che sporgono dalla forma cilindrica in modo che possano essere globalmente caricate a torsione. Queste molle sono impiegate in molti campi. In Fig. 19 ne sono riportati alcuni tipi. Queste molle si possono realizzare anche partendo da un tubo di materiale togliendo per asportazione materiale fra una spira e l'altra.

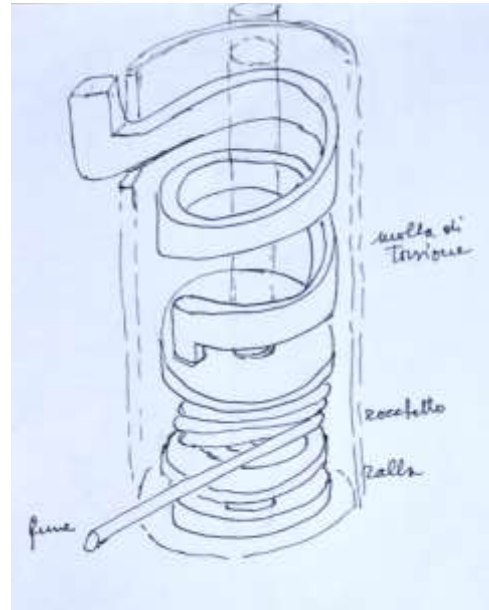


Figura 19. Odiere molla di torsione e un possibile schema del loro impiego all'interno dei nostri cilindri. In alto un possibile ancoraggio alla struttura, in basso una ralla per permettere la rotazione e sostenere un precarico assiale.

6- Molle a nastro o a spirale piatta

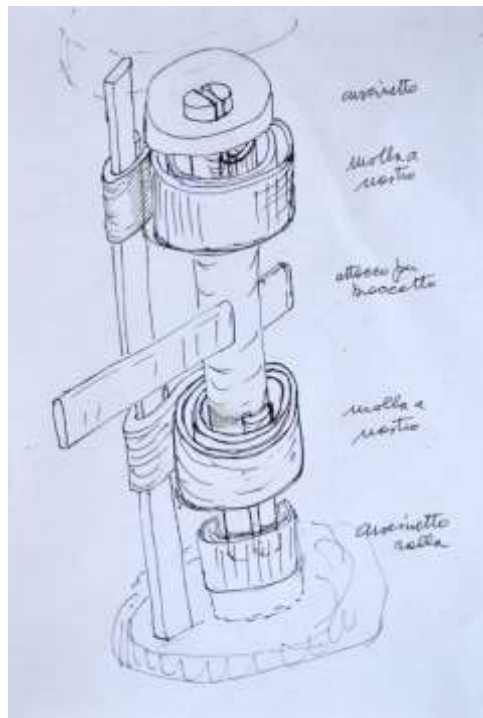
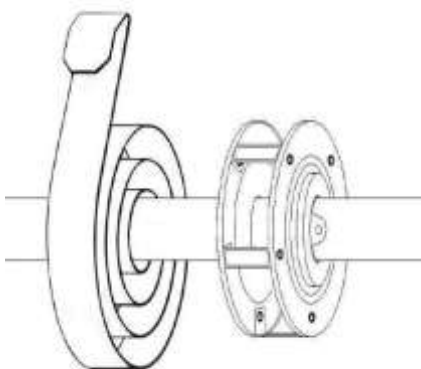


Figura 20. Una molla a nastro impiegata in una serranda e il modello

Il funzionamento simile, ma rovesciato, a quello delle serrande. Impiega un albero centrale sul quale si avvolgono una o più molle a nastro, l'albero è supportato da cuscinetti. In basso occorre prevedere anche un cuscinetto

assiale. L'estremità delle molle si impegnano su di un'asta laterale che viene fissata alle estremità. Il braccio viene trasversalmente impegnato in una cava realizzata nell'albero centrale. A questa soluzione, per la elevata possibilità di rotazione, può essere anche affiancato un secondo modello nel quale si può avere un tamburo centrale sul quale si avvolge e si svolge un tendine o una fune che può essere impiegata al posto dei braccetti Fig. 20.

Scelta ragionata della tipologia in base ai vincoli geometrici e ottimizzando l'efficienza

Per il dimensionamento di massima in moduli (in questo caso il modulo, per necessità, non viene identificato direttamente con un elemento funzionale) ci si basa sulle proporzioni tratte dalle immagini della Colonna Traiana, Fig.21.

Questo proporzionamento viene tenuto presente nella successiva analisi delle tipologie in modo da valutarne la fattibilità costruttiva, pensando che la superficie cilindrica interna sia pari a circa 0,9 moduli, cioè circa 130 mm.

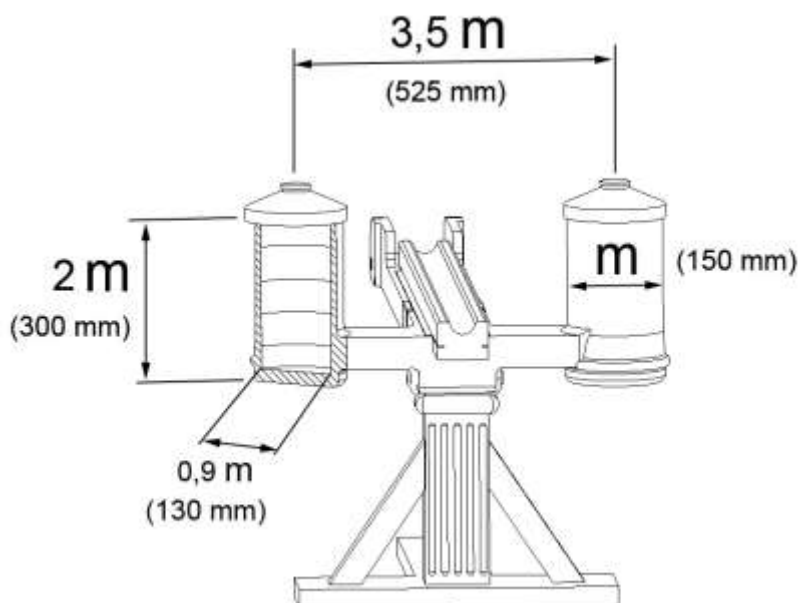


Figura 21. Disegno con quote in "moduli".

I modelli delle tipologie sopra-esposte, caratteristiche e dimensioni richieste

Per ogni modello viene riportata una scheda, con una rappresentazione tridimensionale avente maggiori dettagli rispetto agli schizzi già visti, nella quale vi è uno schema del calcolo impiegato per un dimensionamento di massima Figg.22÷31 e alcune considerazioni sintetiche conclusive.

Sono disponibili due lavori sul dimensionamento delle baliste con elemento elastico lavorante globalmente a torsione: uno trattato al continuo ipotizzando un certo grado di riempimento della matassa trattata come trave di torsione [17] ed uno al discreto prendendo in considerazione il contributo di ogni singolo filo lavorante a trazione [1].

Modello tipo 1 ASPO di fili

materiale fili: TENDINI
 modulo elastico $E = 4000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 50 \text{ MPa}$

energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$

rotazione braccetti $\vartheta = 45^\circ$
 altezza motore $L = 240 \text{ mm}$

diametro filo avvolto $D = 20 \text{ mm}$

coef. riempimento $\text{riemp} = 0.85$

sezione efficace $A_{\text{eff}} := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \text{riemp} = 267.035 \text{ mm}^2$

Allungamenti diversa tra le due metà del filo, una metà inizialmente si accorcia poi ricomincia ad allungarsi, l'altra si allunga e basta.

- lunghezza iniziale $L_0 := 120.18 \text{ mm}$

- lunghezza finale (sopra) $L_{\text{su}} := 120.67 \text{ mm}$

- deformazioni $\epsilon_{\text{su}} := \frac{L_{\text{su}} - L_0}{L_0} = 0.004$

- tensioni $\sigma_{\text{su}} := E \cdot \epsilon_{\text{su}} = 16.309 \text{ MPa}$

- trazione $F_{\text{Nsu}} := A_{\text{eff}} \cdot \sigma_{\text{su}} = 4355.04 \text{ N}$

- forza circonferenziale $F_{\text{Csu}} := F_{\text{Nsu}} \cdot \frac{\text{spost}}{L_{\text{su}}} = 902.26 \text{ N}$

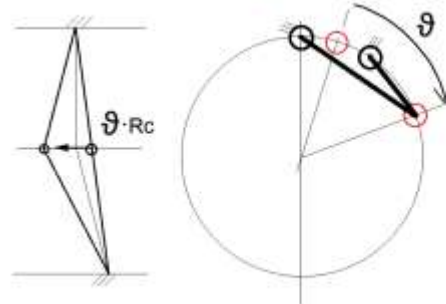
- coppia intero aspo (avvolgimento 4 'fill') $M_{\text{aspo}} := 4 \cdot (F_{\text{Csu}} + F_{\text{Cgiu}}) \cdot \text{braccio} = 526.77 \text{ N}\cdot\text{m}$

- energia da un motore $W_{\text{el}} := \frac{M_{\text{aspo}} \cdot \theta}{2} = 206.864 \text{ J}$

- energia di lancio (2 motori) $W_{\text{lancio}} := 2 \cdot W_{\text{el}} = 413.728 \text{ J}$

Considerazioni:

- alcuni fili troppo sollecitati con una rotazione di 45° .
- energia NON sufficiente, si potrebbe aumentare rotazione ma i fili sono già oltre il limite elastico.
- difficoltà nella messa a punto per intercambiabilità (fissaggio fili e rilassamento).



- lunghezza finale (sotto) $L_{\text{giu}} := 122.75 \text{ mm}$

- deformazioni $\epsilon_{\text{giu}} := \frac{L_{\text{giu}} - L_0}{L_0} = 0.021$

- tensioni $\sigma_{\text{giu}} := E \cdot \epsilon_{\text{giu}} = 85.538 \text{ MPa}$

- trazione $F_{\text{Ngiu}} := A_{\text{eff}} \cdot \sigma_{\text{giu}} = 22841.768 \text{ N}$

- forza circonferenziale $F_{\text{Cgiu}} := F_{\text{Ngiu}} \cdot \frac{\text{spost}}{L_{\text{giu}}} = 4652.09 \text{ N}$

Figura 22. Modello tipo 1 - Fili raggruppati in una matassa avvolta su aspo.

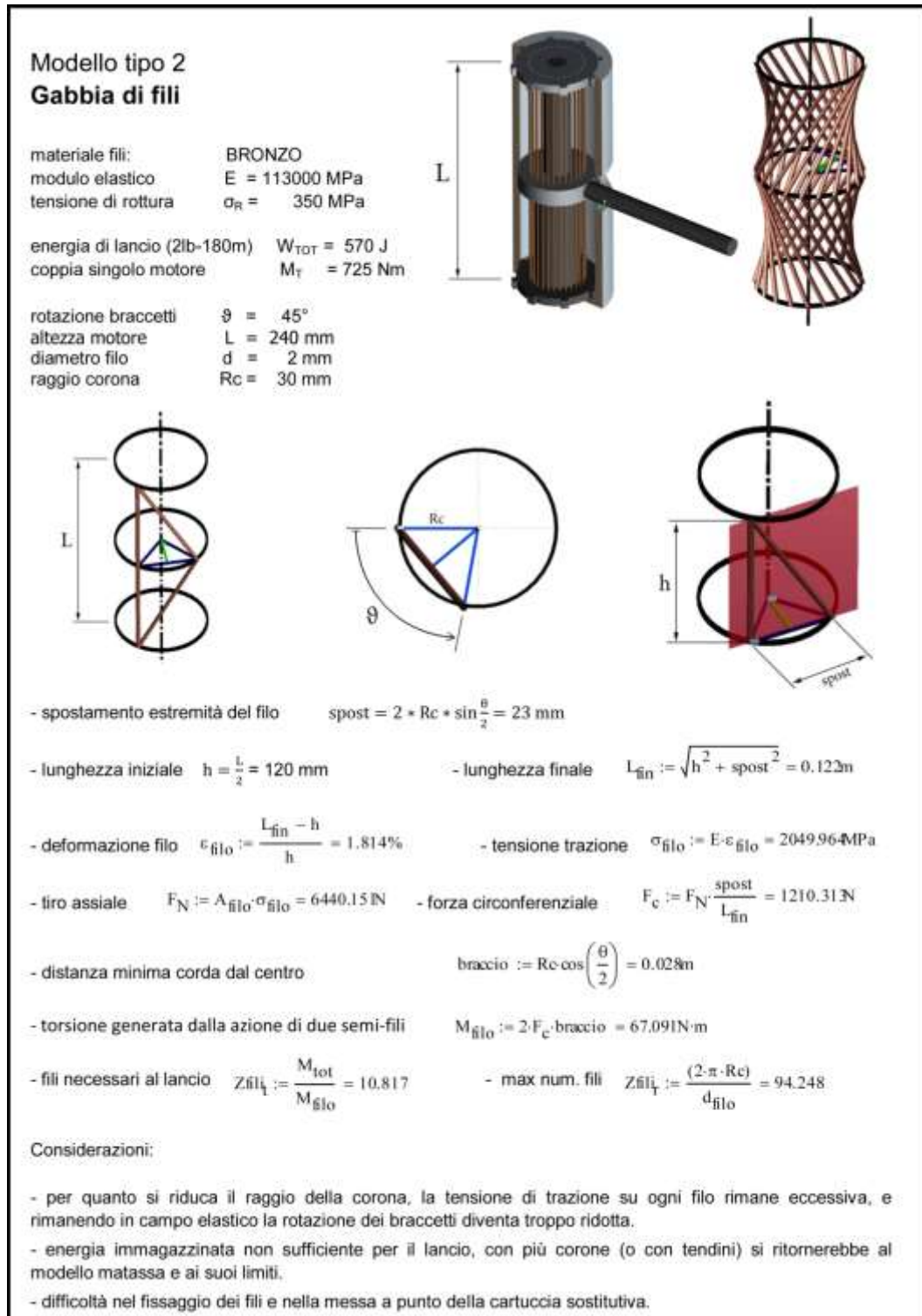


Figura 23. Modello tipo 2 - Fili multipli fra loro separati

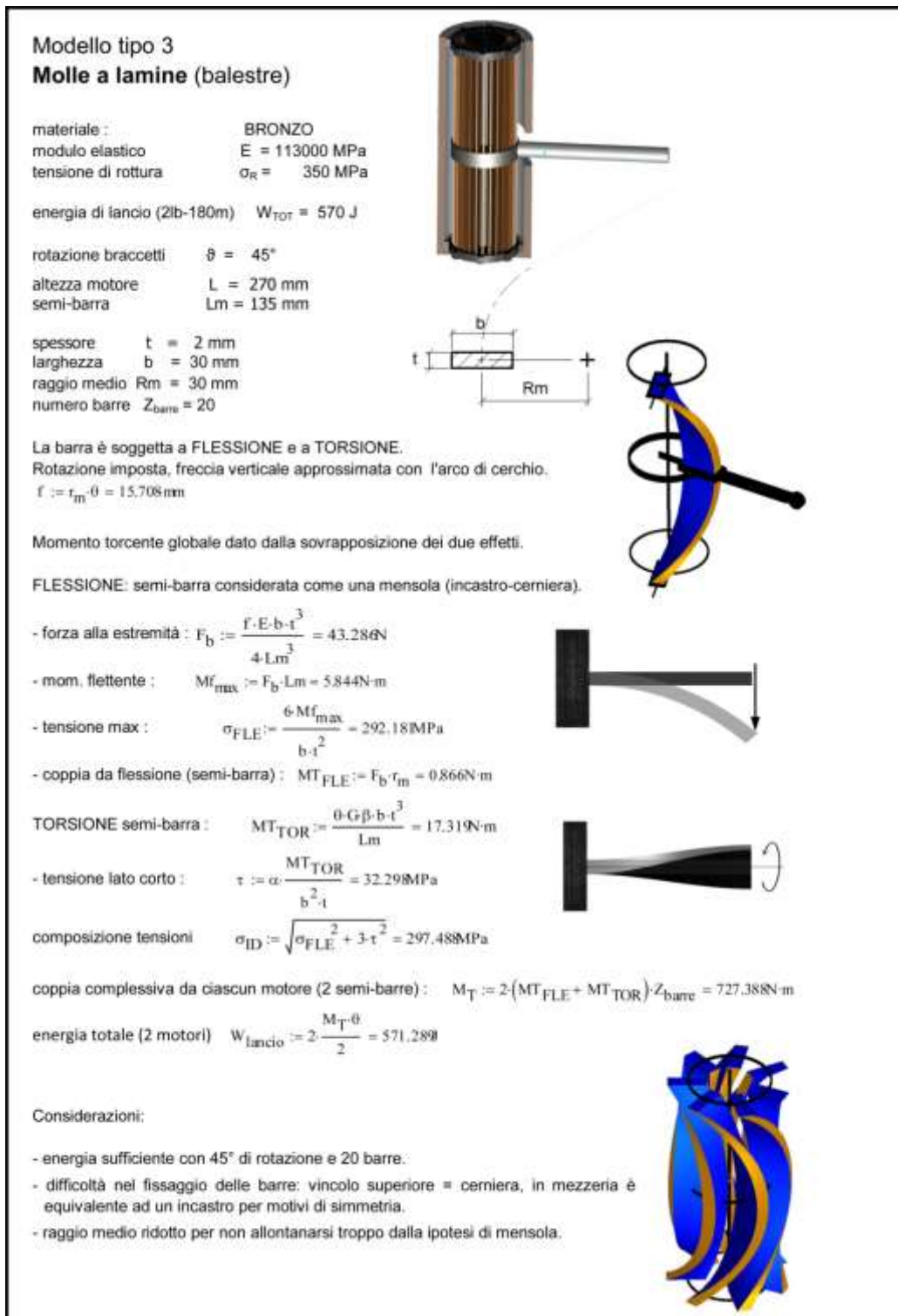
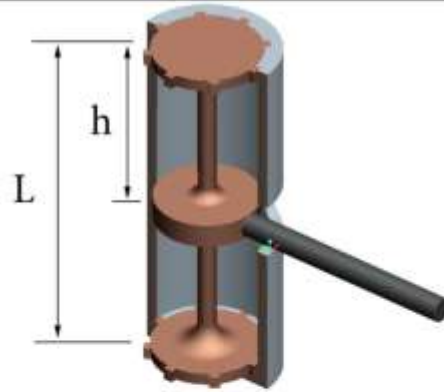


Figura 24. Modello tipo 3 - Molle a lamine (balestre) in parallelo

Modello tipo 4 Barre di torsione

materiale:	BRONZO
modulo elastico	$E = 113000 \text{ MPa}$
tensione di rottura	$\sigma_R = 350 \text{ MPa}$
energia di lancio (2lb-180m)	$W_{TOT} = 570 \text{ J}$
coppia singolo motore	$M_T = 725 \text{ Nm}$
rotazione braccetti	$\vartheta = 45^\circ$
altezza motore	$L = 240 \text{ mm}$
semi-barra	$h = 120 \text{ mm}$



- diametro barra per generare M_T con 45° di rotazione

$$D := \sqrt[4]{\frac{32 M_T \cdot h}{\pi \cdot G \cdot \vartheta}} = 10.76 \text{ mm}$$

- massima tensione tangenziale

$$\tau := \frac{16 M_T}{\pi \cdot D^3} = 1484.39 \text{ MPa}$$

oppure, partendo dalla tensione di rottura:

- diametro per resistere ad una coppia M_T

$$D_{\tau} := \sqrt[3]{\frac{16 M_T}{\pi \cdot \tau_R}} = 21.94 \text{ mm}$$

- coppia con rotazione 45° , D_{τ} e h

$$M_{\tau} := \frac{\vartheta \cdot G \cdot \pi \cdot D_{\tau}^4}{32 \cdot h} = 6277.23 \text{ N}\cdot\text{m}$$

- rotazione necessaria per generare M_T con D_{τ}

$$\vartheta_{\tau} := \frac{32 M_T \cdot h}{\pi \cdot G \cdot D_{\tau}^4} = 2.6^\circ$$

- altezza semi-barra D_{τ} necessaria per ruotare di 45° con M_T

$$h_{\tau} := \frac{\vartheta \cdot \pi \cdot G \cdot D_{\tau}^4}{32 M_T} = 2.08 \text{ m}$$

Considerazioni:

- incompatibilità tra ingombri, angolo di rotazione imposti, e dimensioni necessarie per ottenere la energia di lancio con questo tipo di motore.

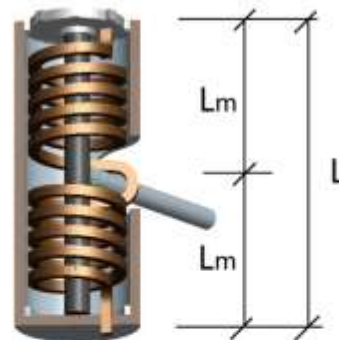
Figura 25. Modello tipo 4 - Barra di torsione

Modello tipo 5A Molle di torsione doppie

materiale : BRONZO
 modulo elastico $E = 113000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 350 \text{ MPa}$

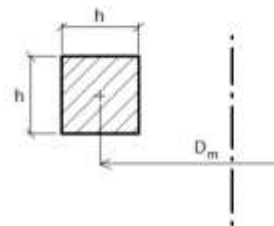
energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$
 coppia singolo motore $M_T = 725 \text{ Nm}$

rotazione braccetti $\vartheta = 45^\circ$
 altezza motore $L = 240 \text{ mm}$
 semi-barra $L_m = 120 \text{ mm}$



lato sezione quadra $h = 19 \text{ mm}$
 diametro avvolgimento $D_m = 120 \text{ mm}$
 spire semi-molla $Z_{spire} = 6$

- verifica altezza molla $L_r := h \cdot Z_{spire} = 114 \text{ mm}$



carico nel senso di avvolgimento dell'elica:
 il filo lavora a FLESSIONE

- tensione sul bordo interno del filo $\sigma_{max} := \frac{6 \cdot Mm_t}{h^3} = 317.428 \text{ MPa}$ - con fatica $\sigma^1_{max} := 1.12 \cdot \sigma_{max} = 355.52 \text{ MPa}$

(coeff. 1,12 dal rapporto $\frac{D_m}{h} = 6.316$, da fig.11-4 Wals pag 135)

- rotazione $tums := \frac{6 \cdot Mm_t \cdot Z_{spire} \cdot D_m}{E \cdot h^4} = 0.106$ - angolo: $\varphi := tums \cdot 360 = 38.322$

- energia immagazzinata nella semi-molla $W_{el} := \frac{Mm_t \cdot \varphi \cdot \pi}{2 \cdot 180} = 121.353 \text{ J}$

- energia totale (lancio) $W_{lancio} := 4 \cdot W_{el} = 485.412 \text{ J}$

Considerazioni:

- energia immagazzinata non sufficiente.
- con più di 45° di rotazione si potrebbe accumulare più energia.
- però cala il momento torcente.

Figura 26. Modello tipo 5 - Molle di torsione da entrambi i lati e realizzate in bronzo

Modello tipo 5B

Molle di torsione doppie

materiale : ACCIAIO
 modulo elastico $E = 210000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 600 \text{ MPa}$

energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$
 coppia singolo motore $M_T = 725 \text{ Nm}$

rotazione braccetti $\vartheta = 45^\circ$
 altezza motore $L = 240 \text{ mm}$
 semi-barra $L_m = 120 \text{ mm}$

lato sezione quadra $h = 16 \text{ mm}$
 diametro avvolgimento $D_m = 120 \text{ mm}$
 spire semi-molla $Z_{spire} = 7$

- verifica altezza molla $L_r := h \cdot Z_{spire} = 112 \text{ mm}$

carico nel senso di avvolgimento dell'elica:
 il filo lavora a FLESSIONE

- tensione sul bordo interno del filo $\sigma_{max} := \frac{6 \cdot M m_T}{h^3} = 531.553 \text{ MPa}$

- con fatica $\sigma_{fmax} := 1.09 \cdot \sigma_{max} = 579.392 \text{ MPa}$ (coeff. 1.09 dal rapporto $\frac{D_m}{h} = 7.5$, da fig.11-4 Wals pag 135)

- rotazione $tums := \frac{6 \cdot M m_T \cdot Z_{spire} \cdot D_m}{E \cdot h^4} = 0.133$ - angolo: $\varphi := tums \cdot 360 = 47.84$

- energia immagazzinata nella semi-molla $W_{el} := \frac{M m_T \cdot \varphi \cdot \pi}{2 \cdot 180} = 151.493 \text{ J}$

- energia totale (lancio) $W_{lancio} := 4 \cdot W_{el} = 605.97 \text{ J}$

Considerazioni:

- energia immagazzinata sufficiente.
- angolo di rotazione accettabile.

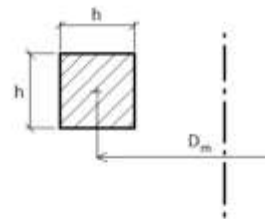
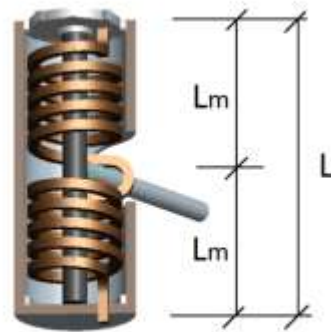


Figura 27. Modello tipo 5 - Molle di torsione da entrambi i lati e realizzate in acciaio

Modello tipo 5C

Molle di torsione singole

materiale : BRONZO
 modulo elastico $E = 113000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 350 \text{ MPa}$

energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$
 coppia singolo motore $M_T = 725 \text{ Nm}$

rotazione braccetti $\varphi = 45^\circ$
 altezza motore $L = 240 \text{ mm}$

lato sezione quadra $h = 24 \text{ mm}$
 diametro avvolgimento $D_m = 100 \text{ mm}$
 spire semi-molla $Z_{spire} = 10$

- verifica altezza molla $L_r := h \cdot Z_{spire} = 0.24 \text{ m}$

carico nel senso di avvolgimento dell'elica:

il filo lavora a FLESSIONE

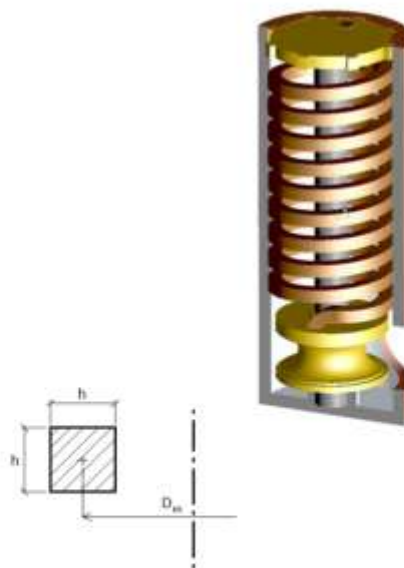
- tensione sul bordo interno $\sigma_{max} := \frac{6 \cdot M_t}{h^3} = 314.994 \text{ MPa}$ - con fatica $\sigma_{lmax} := 1.18 \sigma_{max} = 371.693 \text{ MPa}$

(coeff. 1,18 dal rapporto $\frac{D_m}{h} = 4,167$, da fig 11-4 Wals pag 135)

- rotazione $\text{turns} := \frac{6 \cdot M_t \cdot Z_{spire} \cdot D_m}{E \cdot h^4} = 0.116$ - angolo: $\varphi := \text{turns} \cdot 360 = 41.813$

- energia immagazzinata nella molla $W_{el} := \frac{M_t \cdot \varphi \cdot \pi}{2 \cdot 180} = 264.818 \text{ J}$

- energia totale (lancio) $W_{lancio} := 2 \cdot W_{el} = 529.636 \text{ J}$



Considerazioni:

- rotazione scarsa ed energia immagazzinata non sufficiente.
- sezione filo massiccia.
- scarsa compatibilità con la struttura della balista per via della posizione di uscita dei braccetti (o del tamburo)

Figura 28. Modello tipo 5 - Molla di torsione solo da un lato e realizzata in bronzo

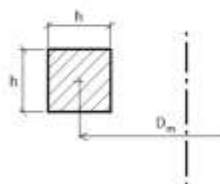
Modello tipo 5D
Molle di torsione singole

materiale fili: ACCIAIO
 modulo elastico $E = 210000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 600 \text{ MPa}$

energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$
 coppia singolo motore $M_T = 725 \text{ Nm}$

rotazione braccetti $\vartheta = 45^\circ$
 altezza motore $L = 240 \text{ mm}$

lato sezione quadra $h = 20 \text{ mm}$
 diametro avvolgimento $D_m = 100 \text{ mm}$
 spire semi-molla $Z_{spire} = 10$



carico nel senso di avvolgimento dell'elica:
 il filo lavora a FLESSIONE

- tensione sul bordo interno $\sigma_{max} := \frac{6 \cdot M_T}{h^3} = 544,3 \text{ MPa}$ - con fatica $\sigma_{fmax} := 1,16 \cdot \sigma_{max} = 631,399 \text{ MPa}$

(coeff. 1,16 dal rapporto $\frac{D_m}{h} = 5$, da fig.11-4 Wals pag 135)

- rotazione $tums := \frac{6 \cdot M_T \cdot Z_{spire} \cdot D_m}{E \cdot h^4} = 0,13$ - angolo: $\varphi := tums \cdot 360 = 46,655$

- energia immagazzinata nella molla $W_{el} := \frac{M_T \cdot \varphi \cdot \pi}{2 \cdot 180} = 295,483 \text{ J}$

- energia totale (lancio) $W_{lancio} := 2 \cdot W_{el} = 590,965 \text{ J}$

Considerazioni:

- rotazione ed energia immagazzinata sufficienti.
- sezione filo massiccia.
- scarsa compatibilità con la struttura della balista per via della posizione di uscita dei braccetti (o del tamburo)

Figura 29. Modello tipo 5 - Molla di torsione solo da un lato e realizzata in acciaio

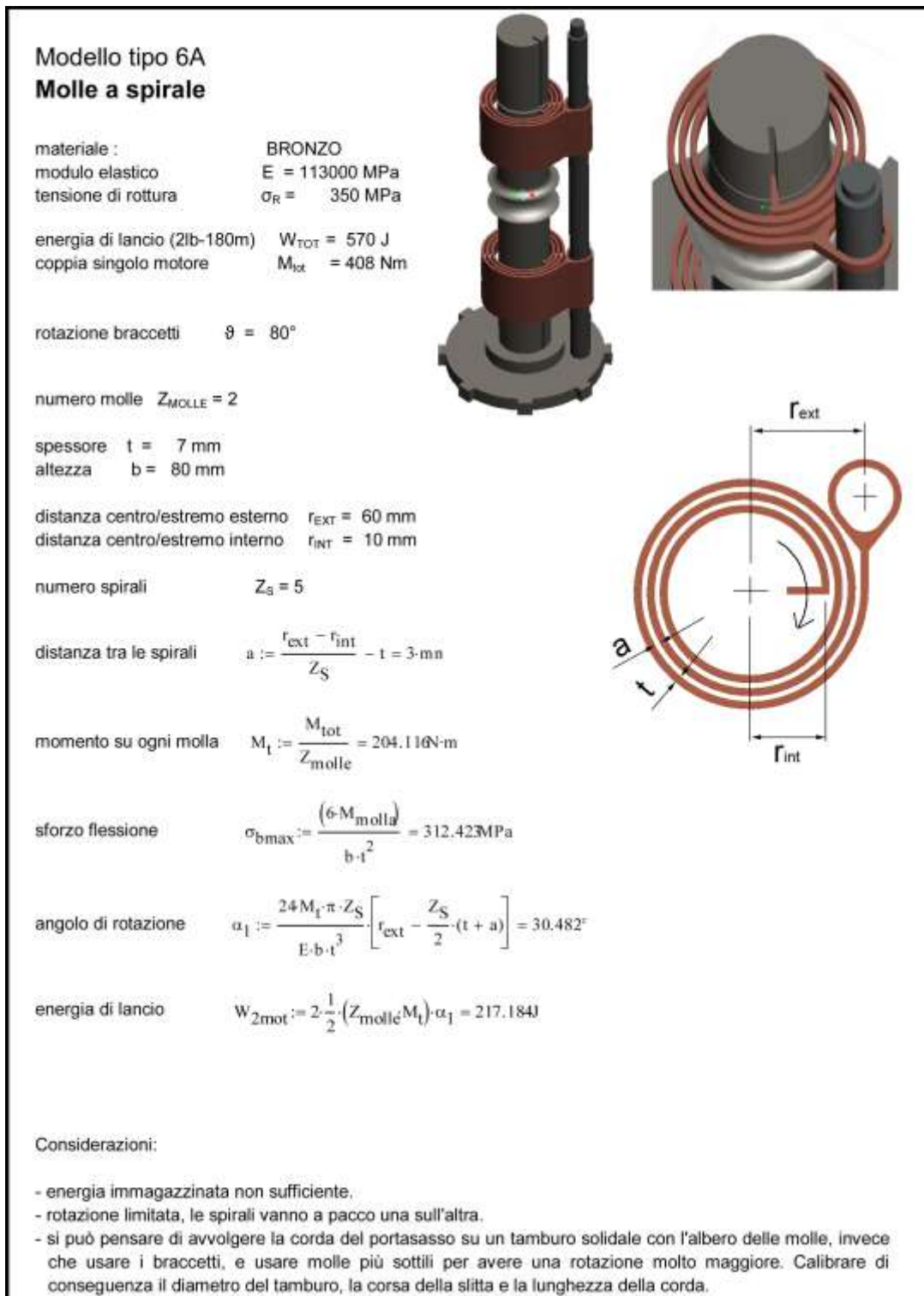


Figura 30. Modello tipo 6 - Molle a nastro con nastro in bronzo

Modello tipo 6B
Molle a spirale

materiale : ACCIAIO
 modulo elastico $E = 210000 \text{ MPa}$
 tensione di rottura $\sigma_R = 600 \text{ MPa}$

energia di lancio (2lb-180m) $W_{TOT} = 570 \text{ J}$
 coppia singolo motore $M_T = 408 \text{ Nm}$

rotazione braccetti $\theta = 80^\circ$

numero molle $Z_{MOLLE} = 2$

spessore $t = 6 \text{ mm}$
 altezza $b = 60 \text{ mm}$

distanza centro/estremo esterno $r_{EXT} = 60 \text{ mm}$
 distanza centro/estremo interno $r_{INT} = 10 \text{ mm}$

numero spirali $Z_S = 5$

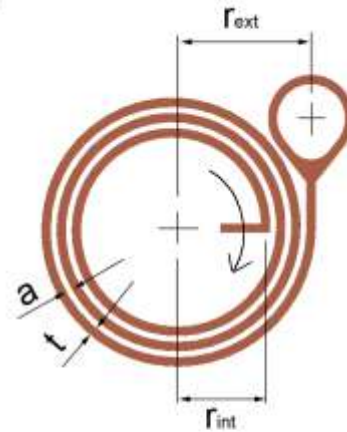
distanza tra le spirali $a := \frac{r_{EXT} - r_{INT}}{Z_S} - t = 4 \text{ mm}$

momento su ogni molla $M_{molla} := \frac{M_T}{Z_{molle}} = 204.116 \text{ N}\cdot\text{m}$

sforzo flessione $\sigma_{bmax} := \frac{(6 M_T)}{b \cdot t^2} = 566.98 \text{ MPa}$

angolo di rotazione $\alpha_1 := \frac{24 M_T \cdot \pi \cdot Z_S}{E \cdot b \cdot t^3} \left[r_{EXT} - \frac{Z_S}{2} \cdot (t + a) \right] = 56.699^\circ$

energia di lancio $W_{2mot} := 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (Z_{molle} \cdot M_T) \cdot \alpha_1 = 403.98 \text{ J}$



Considerazioni:

- rotazione accettabile, ma energia immagazzinata non sufficiente.
- possibilità di usare un tamburo per la corda portasasso : aumentare energia immagazzinata con aumento di rotazione, ma limite dato dallo spazio tra le spirali delle molle.

Figura 31. Modello tipo 6 - Molle a nastro con nastro in acciaio

Per il calcolo delle parti elastiche degli altri tipi si fa riferimento ai calcoli classici delle molle di torsione e delle molle a nastro [20], [21], [22].

Come dati di massima viene considerata la necessità che il singolo "motore" sia alloggiabile all'interno dell'astuccio cilindrico cavo avente diametro esterno pari a 150 mm e diametro interno di 130 mm, altezza esterna di due moduli pari a 300 mm, altezza utile interna di 240 mm, che possa immagazzinare almeno una energia pari a 285 joule, necessaria per lanciare a 180 m di distanza una massa di due libbre (0,644 kg) [1], con una rotazione di circa 45° e che la distanza fra gli assi degli astucci sia 525 mm.

La scelta della tipologia

Analizzate le varie soluzioni proposte, si rileva che il tipo 1 pur presentando un notevole miglioramento rispetto alla soluzione di Erone, dato che permette il caricamento del "motore" dall'alto e un tensionamento più uniforme dei fili, non elimina totalmente la messa a punto, dato l'inevitabile rilassamento dei fili stessi, questa tipologia viene pertanto scartata. Il tipo 2 appare di difficile realizzazione per quanto riguarda l'ancoraggio dei singoli fili e dal calcolo si trova come sia difficile alloggiare, all'interno delle dimensioni definite, la corona di fili necessaria per poter disporre dell'energia fissata. Il tipo 3 supera i vincoli imposti, ma per esso appare abbastanza complicato e non rapido il montaggio, data la molteplicità delle lamelle. Il tipo 4, pur di più semplice realizzazione rispetto ai tipi precedentemente visti, richiede un forte sviluppo verticale che va al di là dei limiti fissati. I tipi 5 e 6 appaiono quelli più adatti dato che non richiedono una messa a punto, presentano una facile intercambiabilità e possono venir confinati nello spazio disponibile. Dal calcolo, il tipo 6 richiede, per fornire l'energia necessaria, caratteristiche meccaniche del nastro che non appaiono compatibili con le pur evolute tecnologie di allora. Per i motivi sopra esposti si sceglie quindi la tipologia 5, cioè quella con molla ad elica globalmente sollecitata a torsione. Si pensa che la molla potesse venire realizzata nelle due tecnologie riportate in Fig.32, la configurazione di destra appare di realizzazione più semplice dato che può essere utilizzato un "filo" a sezione quadrata. La molla viene "sdoppiata" a cavallo dei braccetti per maggiore semplicità costruttiva e per la posizione assiale dei braccetti, rispetto a quanto inizialmente ipotizzato in Fig. 19.

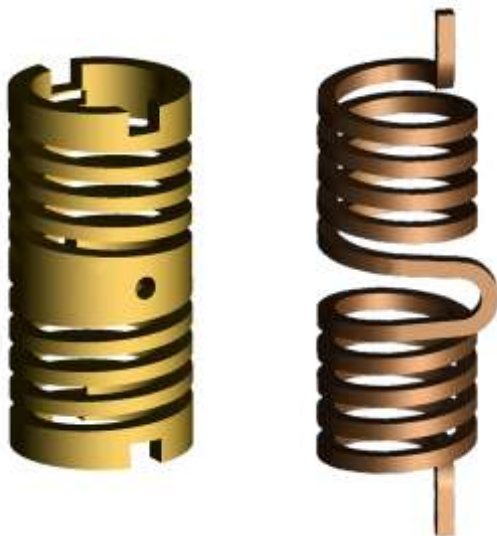


Figura 32. Due possibili soluzioni costruttive dell'elemento elastico.

Impiegando una molla doppia composta di sette spire per parte con un filo a sezione quadra di 16 mm, se realizzata in acciaio e di sei spire con quadro di 19 mm, se realizzata in bronzo, si può ottenere la rotazione richiesta e si può disporre di una coppia anche maggiore di quella fissata.

In conclusione si decide di approfondire solo questo tipo di "motore" dato che è quello che soddisfa le specifiche richieste, appare di maggiore semplicità costruttiva, può alloggiare il braccetto e sostenere assialmente l'alberino, è di facile montaggio e presenta un ridotto numero di parti. In Fig. 33 se ne riporta la sequenza di montaggio con l'inserimento dall'alto della molla, dell'albero centrale, del riscontro/cuscinetto superiore, della cuffia di protezione e l'inserimento di lato del braccetto con filettatura di fissaggio.

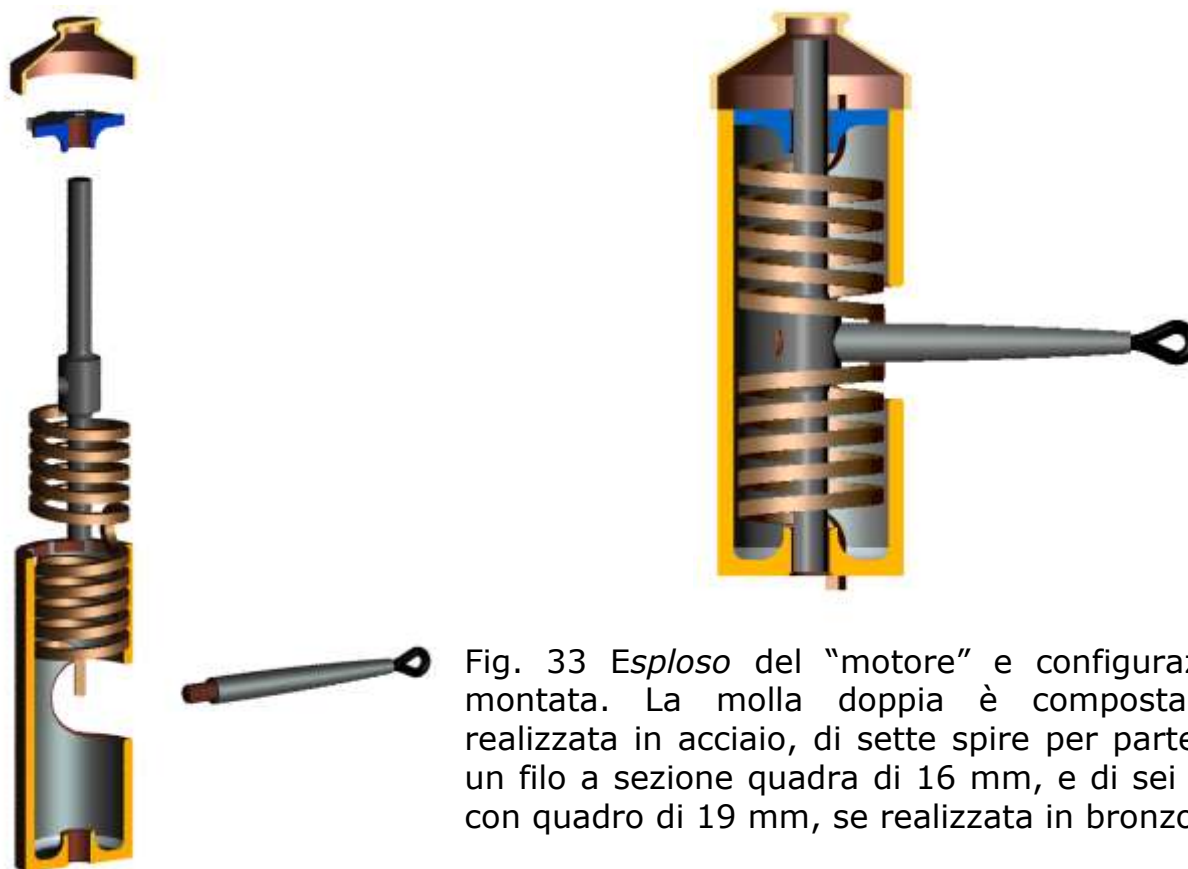


Fig. 33 Esploso del "motore" e configurazione montata. La molla doppia è composta, se realizzata in acciaio, di sette spire per parte con un filo a sezione quadra di 16 mm, e di sei spire con quadro di 19 mm, se realizzata in bronzo.

Il disegno della macchina

Scelta la tipologia costruttiva dell'elemento motore, si pensa di realizzare, come già detto, il telaio per fusione in bronzo in due parti: un basamento e la parte superiore che può ruotare su di esso e che porta gli alloggiamenti per i "motori".

Si progetta una slitta più semplice di quella tradizionale che scorre su guide a coda di rondine [1], pensando, ad una semplice guida realizzata con un piatti in bronzo ancorati alla struttura con ribattini o viti che si impegna in una apposita scanalatura realizzata sulla slitta in legno, come in Fig. 34.

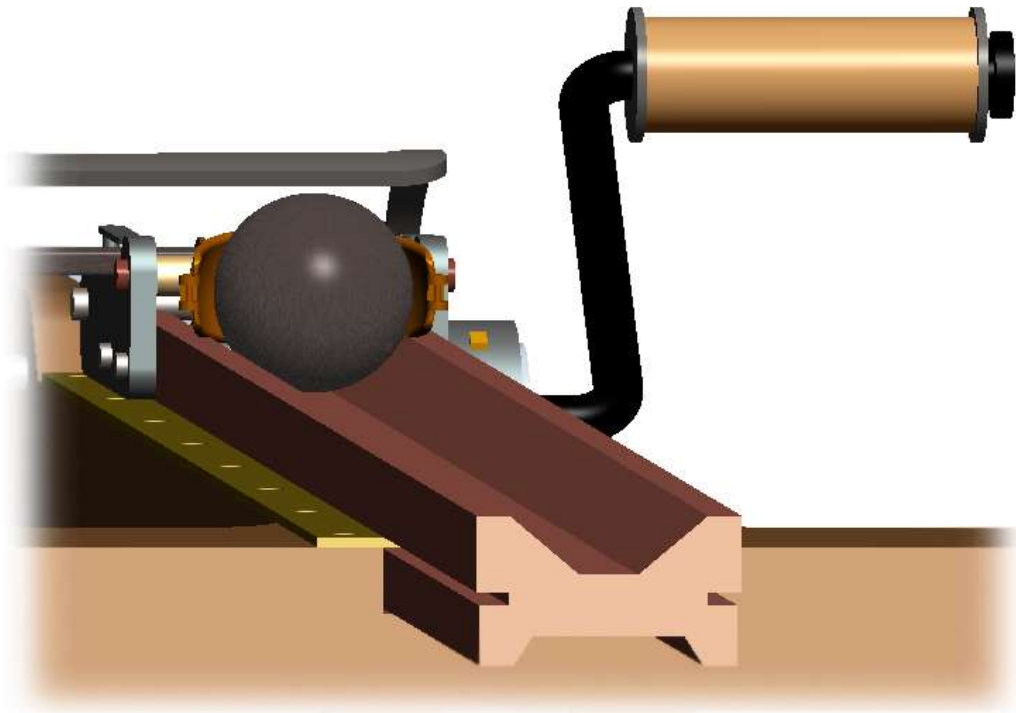


Fig. 34 Particolare della slitta

Si pensa di realizzare la messa in carico della macchina tramite due taglie di legno simili a quelle riportate in Fig. 35, agendo su di un piccolo argano dotato di tamburo pure in legno sul quale viene forzata e ancorata con chiodi una ruota dentata che rimane in posizione tramite nottolini Fig. 36.



Figura 35. Una taglia per ridurre la forza di tiro (da un telaio per la tessitura): le *cochlae lignae* di Ammiano Marcellino [A-2]



Figura 36. Il tipo di ruota dentata sulla quale agiscono nottolini per assicurare il ritegno del tamburo (da carri agricoli).

Forti dell'esperienza precedente [1], si pensa di realizzare lo sgancio con taglio inclinato per rilascio veloce, sicurezza leva di tiro, senza che ci siano parti che si possano separare dalla macchina, in modo semplice come riportato in Fig. 37.

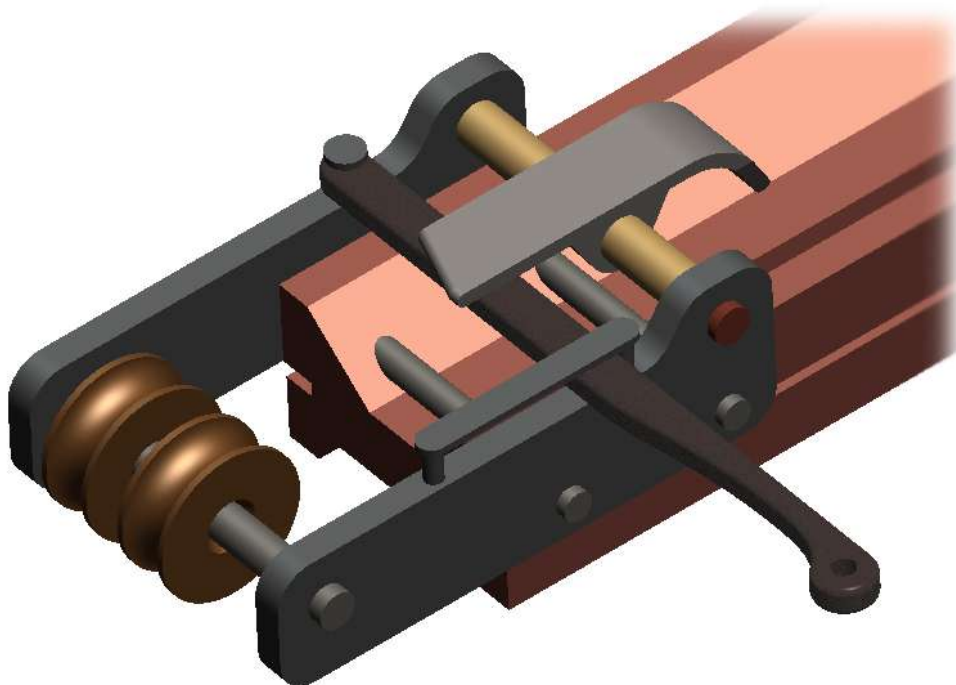


Figura 37. Il particolare dello sgancio

Immagini della macchina ricostruita

Nelle seguenti figure 38, 39, 40, 41 si riportano i disegni in tre dimensioni della macchina, del basamento e della macchina piazzata sul basamento.

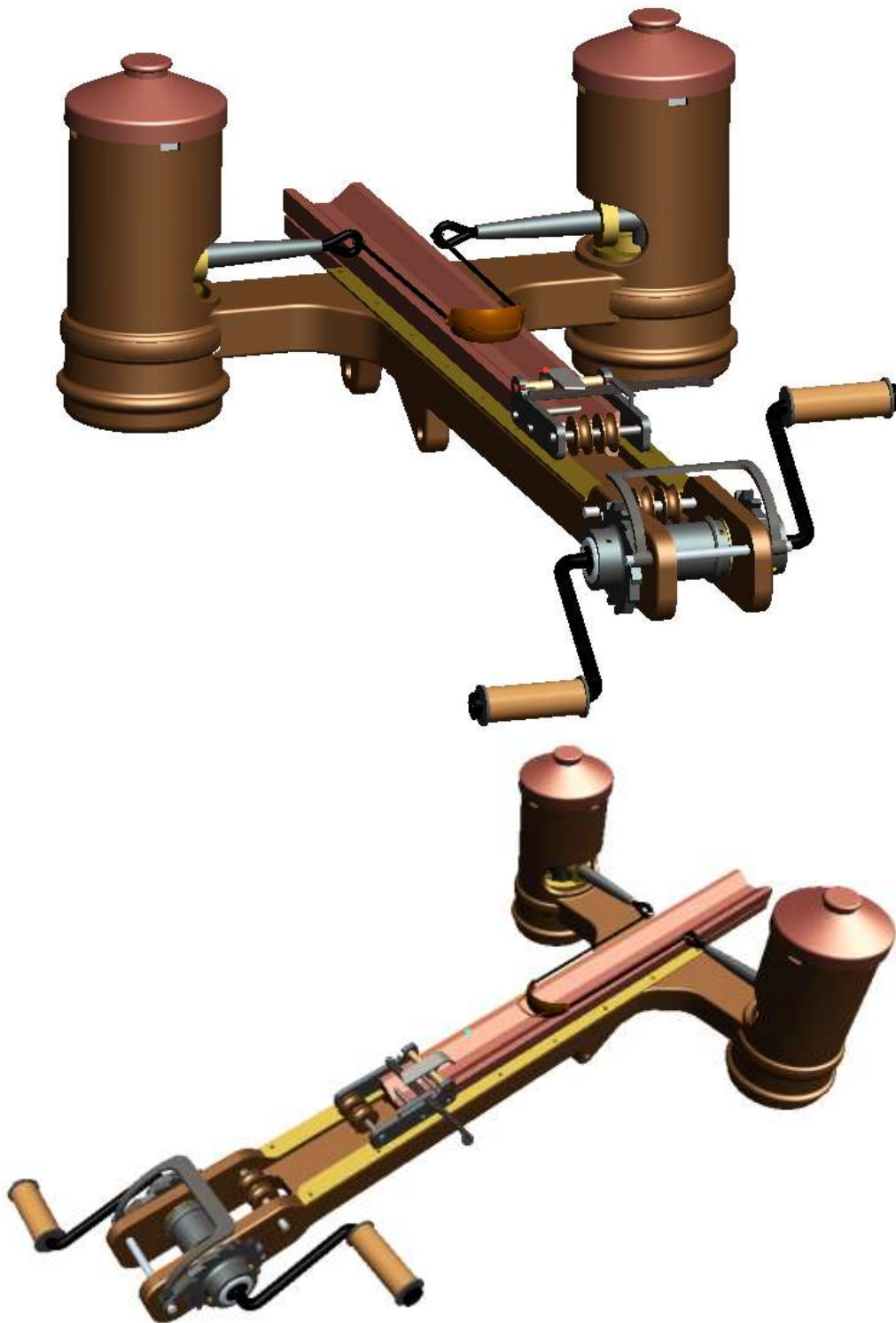


Figura 38 La macchina da due diversi punti di vista

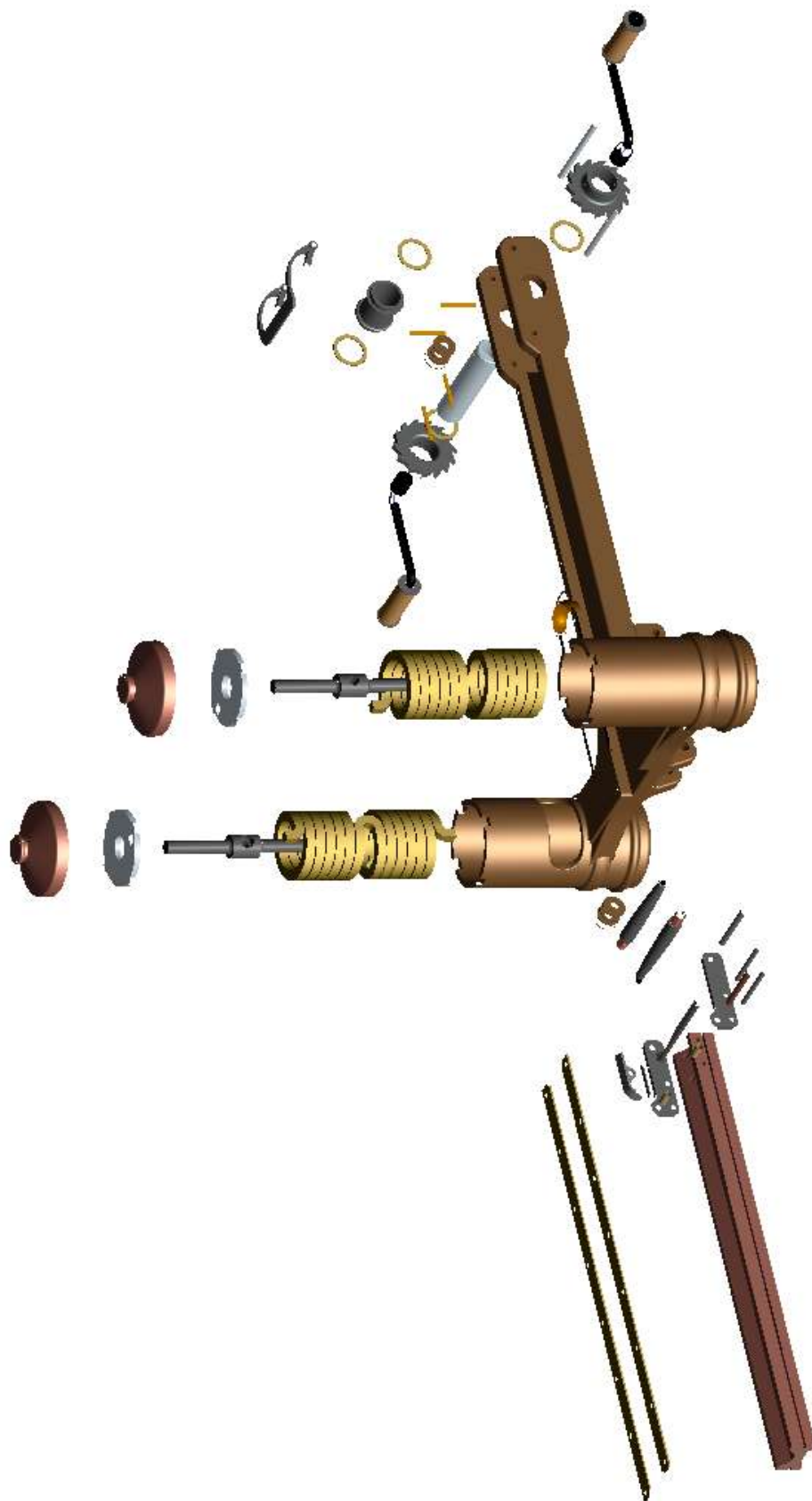


Figura 39 "esploso" della macchina,
da notare il numero molto ridotto di pezzi



Fig. 40 Il basamento e il particolare della regolazione dell'alzo (senza parti che si possano separare).

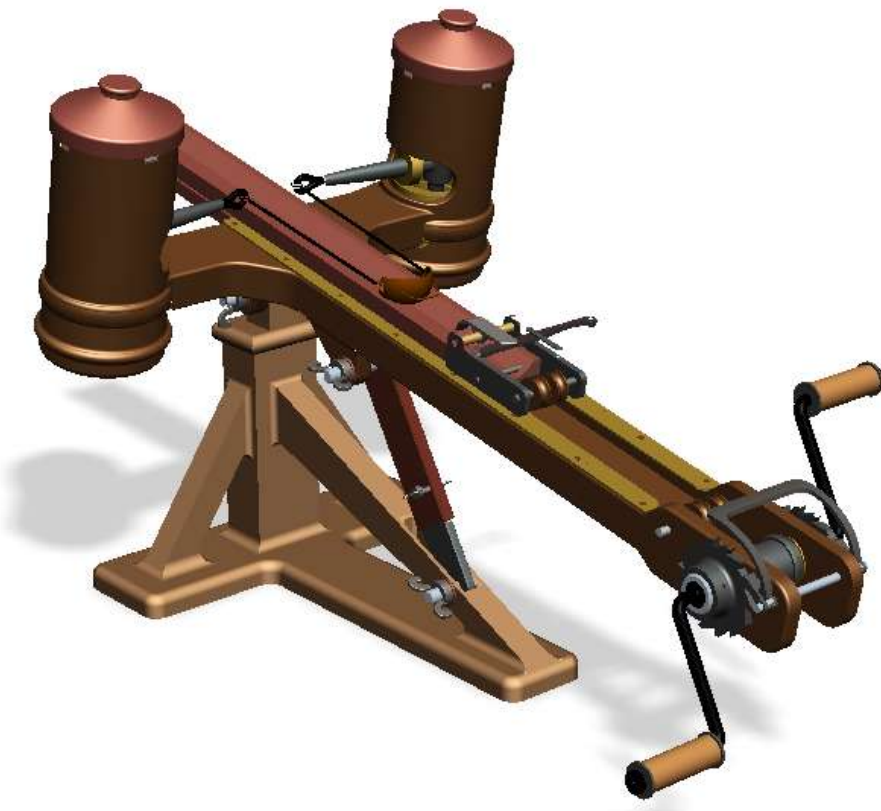


Figura 41 La balista sul suo basamento

La costruzione dei proiettili

Nella immagine riportata in Fig. 8 si può vedere una balista, gli addetti all'arma, alcuni frombolieri. La balista è circondata da cataste che sembrano proiettili da lanciare. Questi proiettili sembrano di piombo e di forma sferica.

La piattaforma di ancoraggio della macchina con possibilità di rotazione

Nella versione carrellata la balista può essere pensata fissata su di una ralla per permetterne la rotazione attorno ad un asse verticale Fig. 42. Il carro può essere pensato opportunamente zavorrato per limitarne il beccheggio durante il lancio. In Fig. 43 si riporta la versione carrellata.



Figura 42. Il carro con piattaforma di ancoraggio della macchina. La piattaforma può ruotare su asse verticale e può essere opportunamente zavorrata.

Conclusioni

La soluzione proposta con molla lavorante globalmente a torsione, ma con le singole spire deformate a flessione, fa ripensare alle parole di sintesi scritte da Leonardo *"questa macchina (Fig.3) scaccerà da sé assai più la pietra. Se l'antenne motrice d'essa pietra si piegheranno alquanto. E questo accadrà perché il moto del tutto fa composto"* e fa pensare come i Romani avessero già

capito come la migliore, e più compatta, composizione del moto si potesse avere avvolgendo ad elica, in verticale, le "antenne motrici".

Sempre in attesa di potere costruire una balista reale e provarla sul campo, tenendo ben presente, pur non essendo proprio guerrafondai, la descrizione di Ammiano Marcellino per cosa può capitare ai ... nemici: *"Quando la freccia è arrivata al punto estremo dove possono arrivare le funi [che legano la sbarra di ferro agli assi di legno] viene colpita dalla balestra per una spinta interna: vola via dagli occhi e a volte scintilla per il grande calore immessovi, cosicchè capita spesso che il dolore [provatone da chi ne viene colpito] riconosca che si tratta di ferita mortale prima che la freccia venga vista."* [A2], si effettua un lancio simulato⁸ !



Figura 43. La balista carrellata: la carroballista.

Ringraziamenti

Si ringraziano Giovanni Brizzi, Anna Maria Liberati, Giangiacomo Martines e Daniela Scagliarini per i preziosi consigli e le puntuali informazioni fornite sulla ricerca delle fonti.

⁸ Il filmato "Ricostruzione della balista imperiale Romana" sarà presto disponibile su youtube.

Bibliografia

- [1] Molari P.G., Maraldi M., Angelini G., Bignami S., Lionello G., La ricostruzione della balista di Vitruvio, AMS Acta Università di Bologna 2012, Atti Giornata Funaioli 2011
- [2] Marco Tullio Pollione Vitruvio, De Architectura Edizioni Studio Tesi, Pordenone 1990 (traduzione di Luciano Migotto)
- [3] Teun Koetsier, La théorie des machines au XVI^e siècle: Tartaglia, Guidobaldo, Galileo, Corpus, n.39 2001 pagg. 155-189
- [4] Flavio Russo, Piccola, potente e maneggevole, Archeo, 311 gennaio 2011 pagg. 104-109
- [5] E.W. Marsden, Greek and roman artillery, Technical Treatises, Oxford, 1971, pp. 106-184.
- [6] Iriarte Aitor, Iriarte, A, 2000: "Pseudo-Heron's cheiroballistra a(nother) reconstruction: I. Theoretics", Journal of Roman Military Equipment Studies, 11, 47-75
- [7] F. Russo, L'artiglieria delle legioni romane, Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato 88-240-3444-6, 2004.
- [8] E.W. Marsden, Greek and Roman Artillery Historical Development, Oxford University Press II, 1969.
- [9] Giuseppe Cascarino, L'esercito Romano voll I, II, Ed Il Cerchio,
- [10] Anna Maria Liberati, Le ballistae della Colonna Traiana, in Adriano La Regina (a cura di), L'arte dell'assedio di Apollodoro di Damasco, Milano, Electa, 1999.
- [11] Hausbuch der Mendelschen Zwölfbrüderstiftung, Band 1, Nürnberg, Mendelsche Zwölfbrüderstiftung, Papier, 169 Bl., 28x19,5 cm, Nürnberg, 1426-1549, Amb.317.2° Folio 18 v.
- [<http://www.nuernberger-hausbuecher.de/index.php?do=query&mo=3&vo=317&rs=2>] 23/5/2012
- [12] Ministero della Difesa, n.104, Istruzione per lavori da zappatore, Roma, 1912
- [13] Leonardo da Vinci, Il codice Atlantico, vol.3 tav 141-208, Giunti Ed., Firenze, 2006
- [14] Valturio Roberto, 1472, De re militari / Roberto Valturio (Contiene, in ripr. facs. digitale: A, De re militari. Verona, Giovanni di Nicolò, 1472. Biblioteca civica di Verona, inc. 1084; B, De re militari. Verona, Giovanni di Nicolò, 1472. Biblioteca civica Gambalunga, Rimini, 4.S.IV.11; C, De re militari, trad. it. di Paolo Ramusio. Verona, Bonini, 1483. Biblioteca civica di Verona, inc. 1020; D, De re militari. Biblioteca Apostolica Vaticana, ms. Urb. lat. 281, 1462), Ed. Guaraldi Rimini ; Y press, Milano, 2006. (N.B. In questa edizione manca il manoscritto, ora conservato alla Ambrosiana di Milano, bellissimo per le illustrazioni, che Sigismondo inviò in dono a Maometto II e che fu intercettato durante il viaggio dai Veneziani).
- [15] Landels, J.G., 1978: Engineering in the Ancient World, Univ. of California
- [16] Iriarte A., The inswinging theory, Gladius XXIII, 2003, pp.111-140
- [17] Filippo Coarelli, La colonna Traiana, Roma, Colombo, 1999. ISBN 88-86359-34-9

[18] Rossi Cesare, Ancient throwing machines: a Method to calculate their performance, Mech & machine theory 51, 2012 1-13.

[19] Leila Nistra, Il ritratto di Apollodoro di Damasco, in Adriano La Regina (a cura di), L'arte dell'assedio di Apollodoro di Damasco, Milano, Electa, 1999.

[20] A. M. Wahl, Mechanical Springs second edition, McGraw-Hill, New York, 1963

[21] Nicholas P. Chironis, Spring Design and Application, McGraw-Hill, New York, 1961

[22] Gustav Niemann, Hans Winter, Bernd-Robert Hohn, Manuale degli organi delle macchine, Tecniche Nuove, Milano, 2006

Autori che scrivono di baliste, soprattutto del loro impiego in battaglia

[A1] GIUSEPPE FLAVIO (Gerusalemme, 37 circa – Roma, 100 circa)

Bell Iud. III, 7

Bell Iud. V,6

Guerra giudaica / Flavio Giuseppe ; a cura di Giovanni Vitucci. – Milano, Oscar Mondadori, 2008, ISBN 9788804406884.

[A2] AMMIANO MARCELLINO (330 circa - 400 circa)

Res Gestae XXIII,4 - anno 362 d.c.

Le storie, Ammiano Marcellino, a cura di Antonio Selem. Torino, UTET, 1987, Testo latino a fronte.

Storie, a Cura di Giovanni Viansino, Oscar Mondadori, Arnoldo Mondadori, Milano, 2001.

[A3] F. RENATO VEGEZIO (metà del V secolo)

Mil II, 25

Mil III, 24

Mil IV 9

L'arte della guerra, Vegezio ; a cura di Luca Canali e Maria Pellegrini. Milano, Oscar Mondadori, 2001, Trad. italiana a fronte, ISBN 8804495472.

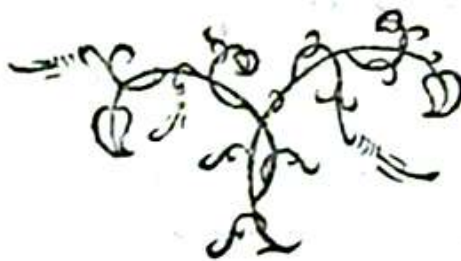
[A4] PROCOPIO (secolo VI, storico Bizantino di Cesarea)

Goth I,21

De rebus bellicis 7 e 18

La guerra gotica, Procopio di Cesarea, traduzione di Domenico Comparetti, Milano, Garzanti, 2005, ISBN 8811366127.

Le guerre persiana, vandalica, gotica, Procopio di Cesarea, a cura di Marcello Craveri, introduzione di Filippo Maria Pontani, Torino, Einaudi, 1977, Collana I millenni.



per la
SESTA GIORNATA DI STUDIO ETTORE FUNAIOLI (VI GEF)
Bologna, 16 luglio 2012

Bologna, Facoltà di Ingegneria, 19/6/2012