



Dalla Frattura alla Scienza dei Metalli

M. Cavallini

Dip. ICMA - Università di Roma "Sapienza", via Eudossiana 18, Roma, Italia

RIASSUNTO. La frattura inizia ad essere considerata oggetto di studio da Leonardo da Vinci e trova in Vannoccio Biringucci ed in Galileo Galilei i precursori di un approccio scientifico al come e perché si produce una rottura. Nell'arco di poco più di un secolo, il sedicesimo, si trovano i primi riferimenti scritti di esperienze e interpretazioni su cui lavorare: i limiti tecnologici e di conoscenza scientifica dei materiali allora disponibili hanno impedito una interpretazione soddisfacente del fenomeno della rottura. Sarebbero occorsi altri due secoli per collegare con una relazione lineare, prima forza e deformazione, e poi tensione e deformazione.

ABSTRACT. Fracture begins to be considered as a subject of investigation by Leonardo da Vinci and finds in Vannoccio Biringucci and Galileo Galilei the forerunners of a scientific approach to the study of how and why rupture occur. In the sixteenth century the oldest written references of experiences and interpretation appear: the scarce technological properties and the lack of a materials science hinder a satisfactory interpretation of the rupture processes. Two more centuries are needed to introduce a linear relationship, firstly, between force and strain, and then between stress and strain.

PAROLE CHIAVE: frattura, storia della scienza, frattografia.

Lo studio dei fenomeni della frattura attraverso l'esame dei reperti per descrivere le morfologie, ricostruire le cause e controllare i meccanismi, ha assunto dignità di scienza solo nel corso del XX secolo; hanno contribuito a fissarne i primi passi, con vari contributi, tre padri nobili toscani: Leonardo da Vinci (1452-1519), Vannoccio Biringucci (1480-1537) e Galileo Galilei (1564-1642). Il primo, Leonardo ingegnere, nel Codice Atlantico si occupa della resistenza di una corda e schizza il disegno di una macchina per provare la resistenza di un filo di ferro. Il secondo, senese, è autore di un trattato organico di metallurgia "De la pyrotechnia" [1] che esce postumo a Venezia nel 1540, nel quale riversa le molteplici esperienze professionali maturate in incarichi alla Zecca di Siena, alla fabbrica del salnitro, come artigliere e fonditore sia a Firenze che a Roma, o architetto e capomastro dell'Opera del Duomo di Siena. Il terzo, pisano, scrive nel 1638 ad Arcetri, dove scontava la condanna del Santo Offizio, i "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" [2, 3], la prima delle quali studia la resistenza dei corpi solidi all'essere spezzati, l'altra si occupa delle ben più famose leggi del moto.

La fragilità, come la duttilità o la durezza sono proprietà dei materiali legate a fenomeni fisici come la rottura di un pezzo, la sua lavorazione in forme complesse, la capacità di incidere o di consumarsi per strisciamento, note (ed utilizzate da millenni) anche prima della definizione

scientifica: se ne intuisce il significato ed è possibile ordinare, in una scala di valori, oggetti diversi. L'approccio scientifico prevede la definizione teorica ed operativa di queste proprietà e ne individua il legame con la struttura dei materiali.

Lo studio della frattura di un corpo solido sottoposto a sollecitazioni richiede la conoscenza tanto della componente meccanica quanto di quella dei materiali. E' ben noto come, nel corso dei secoli, lo sviluppo scientifico delle due discipline abbia avuto andamenti ben diversi, tali da impedire quella sintesi che è necessaria per inquadrare teoria ed esperienza. L'applicazione di geometria e matematica alla meccanica (come alla geodesia, all'astronomia, all'idraulica ...) è, infatti, un patrimonio dalle radici antichissime, che ha trovato una sintesi in Galileo e Newton (1642-1727). La scienza dei materiali, invece, ha avuto un'evoluzione molto più lenta: è fortemente dipendente dalla chimica, che non ha trovato un'inquadramento soddisfacente prima di Lavoisier, alla fine del XVIII secolo. Fin allora la natura intima (struttura) dei materiali era campo di speculazione dei filosofi, che spaziavano dalla teoria atomica (metafisica) di Democrito, a quella aristotelica dei quattro elementi fuocaria-acqua-terra, o degli alchimisti, presi dalle interpretazioni magico-astrologiche o dai miti irraggiungibili, come quello della trasmutazione.

Occuparsi di meccanica dei materiali, tra XVI e XVII se-

colo significa tentare di rendere congruenti, con i pochi strumenti teorici e sperimentali a disposizione, un corpo di conoscenze empiriche e di sapienze antiche, fortemente conflittuali tra di loro.

1 FRATTOGRAFIE

Per secoli la frattura è stata considerata come evento traumatico, negativo, che mette fuori uso un corpo, un manufatto; come tale è stata rappresentata in letteratura e nell'arte. Le più antiche testimonianze pittoriche sono contenute nella rappresentazione di rocce fratturate, di ruderi di fabbricati, di colonne e lance spezzate; elementi coreografici di ambienti aperti, concorrono a caratterizzare scene di natività, calvari, battaglie, conferendo profondità ed effetti prospettici, basti pensare a Giotto, Paolo Uccello, Piero della Francesca. Diventano negli anni sempre più realistiche ed accurate fino ad apparire

delle vere e proprie frattografie: tra le più interessanti ci sono quelle "geologiche" di Jan Van Eyck (Fig. 1), mentre la rottura in carico di punta della lancia conficcata nella testa del drago nel San Giorgio (Fig. 2), di Carpaccio, rappresenta un flash sul fenomeno in atto. Il passaggio da elemento coreografico a testimonianza di un fatto meccanico, il superamento della resistenza del materiale avviene con Leonardo, che fa da trait d'union tra arte e scienza. Leonardo disegna una macchina di trazione costituita da un secchio, appeso al filo da provare, che viene riempito gradualmente di sabbia fino al collasso finale: è la *Sperienza della forza che può fare un filo di ferro di varie lunghezze* [3].

I primi studi si occupano di forze – e non di tensioni – collegate all'evento finale della rottura e non alla deformazione: è la singola categoria di oggetti, come fili o travi, a venir caratterizzata, e non il materiale. Materiale, d'altro canto, così intrinsecamente difettoso da indurre Leonardo ad effettuare prove di trazione su fili



Figura 1. Rocce fratturate in un particolare tratto dalla Adorazione dell'agnello mistico in San Bavone a Gand (1432).

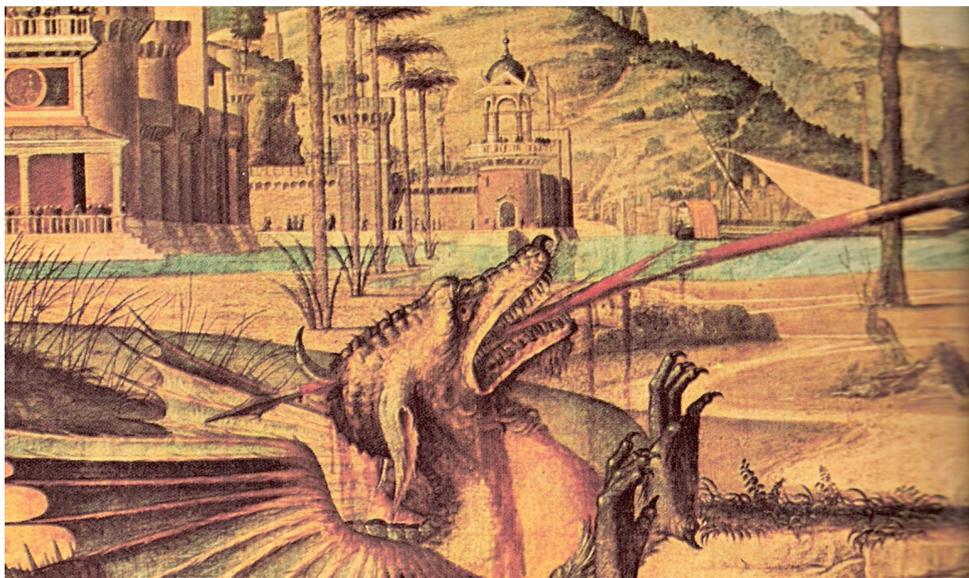


Figura 2. Particolare da San Giorgio in lotta col drago (1502).
Scuola di S.Giorgio degli Schiavoni.

sempre più corti per trovare sperimentalmente che la resistenza diminuisce con la lunghezza, a conferma di quanto poteva constatare in pratica chi si occupava di trafilare i metalli. Questa prova di trazione non caratterizza il materiale, ma il tipo di prodotto e la sua tecnologia di produzione: la forza che viene applicata è dello stesso tipo di quelle che il filo sopporta in servizio.

La indubbia capacità di progettare e costruire senza bisogno di una scienza dei materiali o di quella delle costruzioni non ha sollecitato lo studio di tensioni, deformazioni, né lo sviluppo di materiali funzionali al miglioramento delle prestazioni.

2 IL CONTESTO MENTALE DELLA PIROTECHNIA

Prendendo a prestito il titolo e gli argomenti di un articolo di Alberto Tenenti [4], è opportuno inserire la figura di Biringucci - pratico, ingegnere, architetto, ma non scienziato - nell'ambito delle conoscenze dell'epoca. Biringucci dichiara il rispetto dei principi aristotelici, nella loro evoluzione storica, ai quali fa riferimento nella sua opera [1]: *Dipoi io so che ogni corpo dele cose inferiori bisogna chel sia composto per forza di quatro elementi.* Fuoco-aria-acqua-terra in diverse proporzioni compongono ogni sostanza, ma esalazioni, influenze astrali, spiriti, odori, porosità, male mistioni ... interferiscono per modificarne le caratteristiche, divenendo elementi indispensabili per rendere congruenti le esperienze pratiche con l'ortodossia filosofica. Biringucci si rifugia nel bagaglio del sapere antico, rinunciando a critiche e ad approfondimenti teorici, per i quali sembra non avere gli strumenti culturali: un secolo dopo Galileo avrà non poche difficoltà nel tentativo di percorrere questa strada. Il riferimento ad un materiale ideale è il primo ostacolo da affrontare, assolutamente impraticabile per le tecnologie disponibili all'epoca, ad eccezione, forse, dell'oro, il cui uso come materiale strutturale era ed è del tutto improbabile.

L'oro per Biringucci è il metallo perfetto: *le sue originali & proprie materie altro non sonno che sustantie elementali con equali quantita & qualita luna alaltra proportionate, & suttillissimamente purificate, Per il che congiunte assieme essendo di fortie pari, ne nasce vna amicabile & perfettissima mistione. Et inde appresso la fermentazione & decotione, & al fin si fan fisse & permanenti & di tale vnione congiunte che quasi sonno inseparabili, Tal che dalla virtu del cielo ò dal tempo, ò pur dall'ordine de la sapientissima natura, o da tutti insieme si conuerteno tal sustantie in questo corpo metallico chiamato oro, il quale come è detto per la sua molta temperantia & perfettissima & vnita mestione si fa*

denso, & di tal densita che non sol gli da la permanenti commune, ma quasi la incorruptibilita, & la causa di non poter contenere in se superfluita alcuna, anchor che la fusse sottile & pocha.

Per quanto riguarda l'argento, *dicano li filosofi speculatori dele cose naturali generarsi di sustantia piu aquosa che ignea, & tutte laltre esser simili & pure, non pero tanto quanto son quelle del oro, & pero viene a esser di minor perfettione, & ancho tanto piu quanto e piu debile la influentia dela luna, che quella del sole, anchor chanoi assai piu propinqua ci sia.*

Il rame è *duna sustantia elementale terrea con pocha aquosita metallo infermo foglioso & terrestre, & per tali difetti ingnobile; peggio se legato con lo stagno, vn metallo di natura che corrompe gli altri metalli quando con essi sincorpora.* Lo stagno agisce nel ferro *con la suttilita de suoi spiriti facilmente penetra e laltera & moue fuor di natura rendendolo frangibile & intrattabile.*

Per quanto riguarda la fratturistica, Biringucci, assertore indefesso del "duro e fragile" *materia dura, & per la sua durezza frangibile*, non si avventura in elaborazioni generali o locali di meccanismi di rottura, ma propone continue osservazioni empiriche "qualitative" su materiali che si infragiliscono man mano che si allontanano da uno stato teorico di perfezione. Parlando, ad esempio, degli effetti velenosi dello stagno su argento, oro, ferro e rame, che *non altrimenti che vn veleno possente gli auelena & corrompe*, si intravede un tentativo di correlazione qualitativa tra causa ed effetto: *Et questo non solo il fa con gran quantita di lui, ma con ogni piccola, anzi basta all'argento & loro, lodore solo doue lui sia stato fuso, & cosi ancho al ferro, & al rame facendoli frangibili, & cosi quanto con maggior quantita il qual dessi si troua tanto maggiormente fa gli effetti sui.* Lo stagno è anche responsabile della perdita di duttilità dei metalli perchè *rompe la qualità, olleagina & viscosa che fa il neruo alli metalli, & li fa obbedienti & trattabili all'opere deli artificii.*

Un accenno all'effetto di una forza sulla resistenza dei materiali si può intravedere nella descrizione del funzionamento delle artiglierie. Da parte degli inventori della polvere da sparo, *vedendo tanti effetti & tanta gagliardezza fu pensato che riserrandola in qualche cosa gagliarda potente a farle resistentia facesse effetto mirabile, & cosi fecero di bronzo, ouero di ferro vna canna, laquale turata con vn conio di legno li den fuocho & vedendo come empetuosamente tal conio vsciua pensoro di farne vna che vscisse & percotesse per offesa delle cose & fecero vno stromento di bronzo, ouero di ferro & dentro vi messero delle poluare & vna pietra tonda & la chiamoro spingarda.* Ma la quantità di polvere da caricare deve essere tale che *l'artiglieria che lha a riceuere*

sia tale che sopportare la possa senza pericolo di lesione. Parlando invece delle palle da cannone destinate a spezzarsi in molti pezzi, accioche ogni pezzo facci vn colpo, nelle quali viene ricercata la facilità di rompersi in più parti, raccomanda che la gittarete di materia frangibile, cioe di rame con stagno corrotto forte, ouero di ferro colato.

Un aspetto originale in Biringucci è l'utilizzo della morfologia della frattura come mezzo di giudizio della qualità del prodotto, durante la fabbricazione dell'acciaio: i metallurgisti sene certificano con la isperientia del saggio, & conducendolo sotto il maglio, & disteso & subito piu caldo chel si puo gittandolo nel acqua il temperano, & temperato il rompano, & guardono se per ogni parte al tutto ha mosso natura di non hauer alchun pichol foglio di ferro per dentro. La frattografia, unico strumento allora disponibile per guardare dentro al materiale, avrebbe fatto ulteriori passi nel secolo successivo ricorrendo a sistemi di ingrandimento [5] con Robert Hooke (1635-1703).

L'importanza di Biringucci nello sviluppo della conoscenza moderna sta nel dare "dignità" al materiale, mettendo a disposizione un'enorme messe di informazioni empiriche e nel sottolinearne la crescente incongruenza con i modelli interpretativi. La rinuncia a proporre un suo modello sulla costituzione della materia non gli concede, però, strumenti per contrastare le credenze più diffuse. Può solo ritenere che nessun alchimista potra tanto fare chio creda chabbi in se tanta potentia darte che possi trar dun corpo metallico, o daltra cosa lo spirito suo radicale per trasformare un metallo in un altro, ma d'altra parte non nega le scoperte utili prodotte dala speculatione deli buoni ingegni alchimici. Ed è questo un altro tratto di modernità.

3 LE CAMPANE SFESSE

Lo spirito pratico di Biringucci nel campo della fratturistica raggiunge l'apice quando tratta *el modo di saldar le campane sfesse per le percosse del tropo gran battaglia, o per lo straordinario & sforzato sonare qual spesso nel orlo nel core o in altro luocho si vanno sfendendo, & per tali fenditure perdono el suono*. Si interviene con una saldatura locale, rifondendo i lembi della cricca e colando bronzo della stessa qualità, come mostrato nella figura. Si deve creare una vaschetta di refrattario dentro la campana di vantaggio doue el sfesso, & fatta questa forma grossa quanto vi par & fortificata per ogni caso con tre o quattro verghette di ferro, & ricotta la metterete al suo luocho dentro stuchando bene ogni estremo con terra molle, di poi l'empirete della campana tutto el vano di terra trita alquanto humida ben calchata & la metterete in vna fossa cosi acconcia a iacere sotterrata lassando solo scoperto la sfenditura sopra delaquale se adatta vna manicha (Fig. 3) che pigli le fiamme d'vna fornacetta, & che le porti di sorte che battino sopra alla sfenditura a ponto, & tanto ve le continuerete che non solo scaldino la campana in quel luocho, ma la mollischino facendoli sopra alla fenditura vna volticiuola & vno spiraculo auanti che sia volto in su doue le fiamme eschino, & cosi per questa via essendo la campana condotta dal fuoco in bianco, & disposta in quel luocho doue le fiamme battenno a liquefarsi, con vno ferro la toccharete, & trouando che entri nel metallo la punta pigliarete alquanto di metallo fuso in vno crogiolo o in vna cazzetta & per la bocca dela vscita delle fiamme dela manicha vel gittarete sopra & di nuouo lasserete li due metalli ben scaldar e ben insieme vnirsi. Dipoi quando

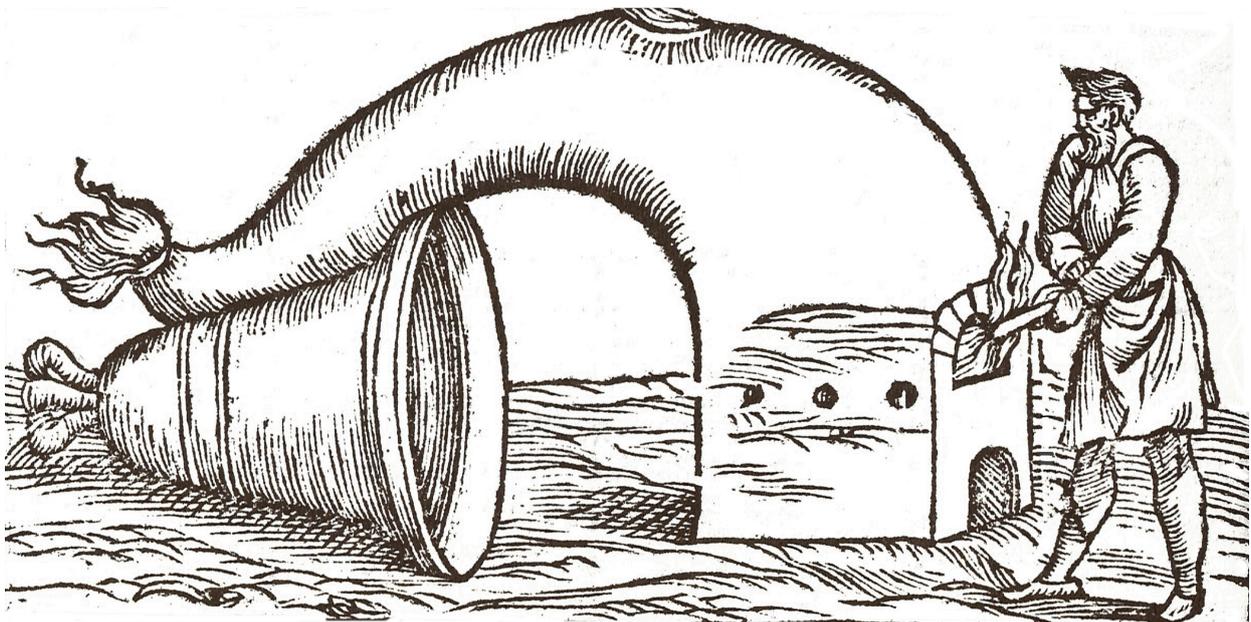


Figura 3. Saldatura della campana fessurata nel disegno tratto dal testo di Biringuccio.

vi parra farete allentar el fuocho & a pocho a pocho la lasserete fredar & freda trouarete la vera campana salda. Il sovrametallo che inevitabilmente si produce, deve essere asportato *cola forza di scarpelli.*

Oltre che per le campane, propone la ricetta anche per la brasatura che serve a saldare vna rottura d'una sega, d'una falce, o d'una spada, pigliando vn pocho d'argento basso, borrhace, o vetro pesto, el luochò della rottura abbracciando con vn paro di tanaglie bollenti tenendola tanto stretta che la saldatura scorga, & così anchora si fredi.

4 LA RESISTENZA DE I CORPI SOLIDI ALL'ESSERE SPEZZATI

Partendo dalle frequentazioni dei Proti dell'Arsenale di Venezia la conferenza de i quali mi hà più volte aiutato nell'investigazione della ragione di effetti non solo marauigliosi, mà reconditi ancora e quasi inopinabili, Galileo si propone di esaminare gli effetti *sinistri e destruttiui* che intervengono nell'esercizio di macchine costruite in diverse scale. Si trova così a dover separare il problema geometrico da quello del materiale, confessando che *questa materia delle resistenze essere un campo pieno di belle ed utili contemplazioni.* Per quanto riguarda il materiale, sulla base della morfologia della frattura, distingue preliminarmente tra i materiali naturali fibrosi o filamentosi, che costituiscono le corde ed i legni, ed i materiali omogenei, come i metallici ed i lapidei. La sua prova di trazione si riduce ad una prova di resistenza con l'applicazione di una forza tale che *violentate da forze gagliarde che dirittamente le tirino, finalmente si separano e si diuidono:* la rottura avviene nei primi per strappo dei filamenti, mentre nei secondi si produce un cedimento della continuità, generata da un indefinito glutine: *E si come nella corda noi intendiamo, la sua resistenza deriuare dalla moltitudine delle fila della canapa che la compongono, così nel legno si scorgono le sue fibre, e filamenti distesi per lungo, che lo rendono grandemente più resistente allo strappamento che non sarebbe qualsiuoglia canapo della medesima grossezza: mà nel Cilindro di pietra, ò di metallo la coerenza (che ancora par maggiore) delle sue parti dipende da altro glutine, che da filamenti, ò fibre, e pure essi ancora da valido tiramento vengono spezzati.* La prova di trazione su una colonna [6] è un grande passo in avanti rispetto a quanto aveva fatto Leonardo, perché la colonna (*il cilindro o prisma AB di legno o di altra materia solida e coerente, fermato di sopra in A e pendente a piombo, al quale nell'altra estremità B sia attaccato il peso C*) non è destinata a sopportare sollecitazioni di trazione: non è una caratterizzazione in opera

ma la ricerca di un dato sperimentale.

Lo studio dei meccanismi di rottura delle fibre non stimola particolarmente Galileo; l'interesse si concentra piuttosto sui materiali omogenei; il problema diventa quello *d'intender, qual sia quel glutine, che si tenacemente ritien congiunte le parti de i solidi, che pur finalmente sono dissolubili: cognizione che pur anco è necessaria per intender la coerenza delle parti de gli stessi filamenti, de i quali alcuni de i solidi son composti.* Ma questo glutine, visco, ò colla, che tenacemente colleghi le particole, delle quali esso corpo è composto deve avere una natura congruente con i fenomeni della fusione e successiva solidificazione dei metalli, a seguito dei quali la resistenza meccanica viene cancellata, per esser di nuovo ripristinata; durante la fusione nulla potrebbe impedire a questa "colla" di *esser' arsa, e consumata in una ardentissima fornace in due, tre, e quattro mesi, né in dieci, ò in cento; doue stando tanto tempo argento, oro e vetro liquefatti, cauati, poi tornano le parti loro, nel freddarsi, à riunirsi, e rattaccarsi, come prima.* Per descrivere il fenomeno della fusione considera il metallo costituito da particole saldamente congiunte, separate da pori, così che *andando il fuoco serpendo trà le minime particole di questo, e di quel metallo, che tanto saldamente si trouano congiunte, finalmente le separa e disunisce; e come poi partendosi il fuoco tornano con la medesima tenacità di prima à ricongiungersi, senza diminuirsi punto la quantità nell'Oro, e pochissimo in altri metalli, anco per lungo tempo, che restino distrutti, pensai, che ciò potesse accadere, perché le sottilissime particole del fuoco penetrando per gli angusti pori del metallo (trà i quali per la loro strettezza non potessero passare i minimi dell'aria né di molti altri fluidi), col riempiere i minimi Vacui trà esse fraposti liberassero le minime particole di quello dalla violenza, con la quale i medesimi Vacui l'una contro l'altra attraggono, proibendogli la separazione; e così, potendosi liberamente muouere, la lor massa ne diuenisse fluida, e tale restasse sin che gl'ignicoli trà esse dimorassero; partendosi poi quelli, e lasciando i pristini Vacui, tornasse la lor solita attrazione, ed in conseguenza l'attaccamento delle parti.*

La resistenza locale dei materiali viene spiegata, con ragionamenti non impeccabili, ricorrendo al principio dell'horror vacui riferendosi alle ragioni d'Aristotele in *confutazion del vacuo, tenendo conto di una composizione del continuo di atomi assolutamente indiuisibili.* Gli atomi sono separati da minuscole cavità tali *Vacui* sarebbebber piccolissimi, ed in conseguenza ciascheduno facile ad esser superato, tuttauia l'innumerabile moltitudine innumerabilmente (per così dire) moltiplica le resistenze. Il vuoto agisce su un'infinità di particelle infinitesime, ma non propone un modello matematico per

descrivere gli effetti. Il glutine non può essere una sostanza reale, che verrebbe alterata dalla fusione del metallo, ma il vuoto che agisce a livello locale tra atomi: il passo mancante è l'introduzione di una forza interatomica sul modello di quella che agisce tra i corpi celesti, che verrà introdotta da Newton verso la fine di quel secolo. Introducendo il vuoto, anche a scala microscopica, Galileo interferisce di nuovo con il rapporto contraddittorio e non risolto tra il Dio onnipotente e lo spazio vuoto, il nulla.

Le analisi della natura della materia ed i tentativi di elaborare una teoria della resistenza meccanica della "trave" proposti da Galileo nella seconda giornata verranno approfonditi e corretti dai suoi allievi e seguaci [3, 7, 8], fino a costituire le basi della moderna scienza delle costruzioni.

5 CONCLUSIONI

I testi riportati, pur distribuiti nell'arco di poco più di un secolo, concordano nel mostrare un approccio "scientifico" allo stato nascente, con accumulo di dati e tentativi di interpretazione: il progresso delle conoscenze ha seguito, anche in questo particolare settore, un percorso tutt'altro che lineare. Leonardo propone una prova di trazione in grado di dare informazioni utili anche oggi, ma i risultati sono viziati dalla difettosità dei materiali. Biringucci, che conosce la frattura sul campo, ha dato dignità di stampa a conoscenze empiriche tratte dalla sua esperienza professionale ed ha usato l'aspetto della frattura come strumento di giudizio sul materiale; dagli alchimisti, ha saputo prendere, con ottimo senso pratico, gli aspetti utili, rigettando le teorie più fantasiose e gli inganni più evidenti. Galileo è interessato alla resistenza

dei solidi, ma non è riuscito a razionalizzare correttamente il problema della trave e a svincolarsi dalla geometria del sistema; non ha introdotto il concetto di tensione, lavorando sulle forze, né quello di deformazione. Forza e deformazione saranno collegati in una relazione lineare ($F = k \cdot \Delta l$) da Robert Hooke alla fine del XVII secolo. Solo con Augustin Cauchy (1789-1857), nel XIX secolo, si arriverà ad una trattazione moderna, con tensione e deformazione applicate ad un mezzo continuo [7-9].

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Vannoccio Biringuccio " De la Pirotechnia 1540 ". A cura di A.Carugo. Ed. Il Polifilo, Milano (1977).
- [2] Galileo Galilei "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" (1638).
- [3] R.L.Colombo, D.Firrao "Sulla storia degli studi di frattura in Italia", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 1 (2007) 19-24.
- [4] A.Tenenti "Il contesto mentale delle pirotechnia " in I.Tognarini (a cura) "Una tradizione senese: dalla Pirotechnia di Vannoccio Biringucci al museo del mercurio" ESI, Napoli, (2000) 19-30.
- [5] S.Smith "A history of metallography" The MIT Press. Cambridge, Massachusetts (1988).
- [6] J.Lemaitre "Petit histoire de l' experimentation en mecanique des solides" *Meccanica*, (2001) 13-35.
- [7] S.P.Timoshenko "History of strength of materials" Dover Publications Inc., NY (1983).
- [8] D.Capecci "Storia della scienza delle costruzioni" Progedit, Bari (2003).
- [9] G.R.Irwin "The historical development of our understanding of fracture" *JOM* (1997) 38-83.