

# Il legno nel '700: aspetti meccanici e d'anatomia

---

Nicola RUGGIERI

---

## PRESENTAZIONE

*Notevole per molti aspetti l'incursione che Ruggeri compie nella ricerca applicata prevalentemente francese, svoltasi nel Settecento, relativa alle caratteristiche del legno per le costruzioni, basata sull'empirismo quindi un esito cospicuo del metodo galileiano. Peraltro opportuna perché la ricerca stessa non è molto conosciuta a livello sistematico e fu desunta in Italia principalmente dalle citazioni di Francesco Milizia alla fine del secolo e, all'inizio dell'Ottocento, dall'opera di Jean Baptiste Rondelet *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*; il volume, tradotto dall'ingegnere Soresina per i Fratelli Negretti di Mantova nel 1835, ebbe in Italia una vastissima quanto meritata diffusione presso i professionisti di costruzioni ed è ancora oggi una fonte qualificata di informazioni di tecnologia avanzata, per quei tempi, delle costruzioni.*

*Molto seria la ricerca effettuata da Ruggeri (che ha tra l'altro compiuto apprezzati studi sulla casa baraccata che fecero seguito agli studi fondamentali di Clementina Barucci sullo stesso argomento), puntualmente esposta dall'autore mettendo in evidenza quanto approfondite, non senza eccezioni, fossero già al tempo le conoscenze sui materiali lignei in particolare; impulso decisivo derivò alla ricerca da sperimentazioni e prove dirette su campioni, eseguite in numero grandissimo, per desumere le caratteristiche generali e quelle meccaniche di campioni minuti, degli alberi e delle membrature, cioè, in quest'ultimo caso di elementi in "dimensione strutturale". Musshenbroek, De Buffon, Duhamel du Monceau sono i nomi più ricorrenti per l'impegno profuso e i risultati ottenuti. L'esposizione non si esime da osservazioni, compiute alla luce delle conoscenze attuali, sulle interpretazioni fornite dai Ricercatori del tempo e desunte dalla messe di dati raccolti, al fine di indicare quali altre tappe siano state necessarie per definire in maniera soddisfacente la natura e l'entità dei fenomeni indagati e dedurre spunti per approfondimenti da cui la costruzione lignea, che attraversa un periodo di rinnovato interesse e pluralità di applicazioni, trarrà vantaggi.*

*La ricerca apre altri orizzonti di speculazione. Quelli relativi, per esempio, all'uso nelle strutture portanti (travi, solai e carpenterie di copertura) del "ferro", che dalla fine del Settecento diventava sempre più disponibile per l'impiego in edilizia in combinazione proprio con il legno (le travi armate, per es., o la capriata Polonceau) oltre che con la muratura e del consolidamento con elementi metallici di strutture lignee esistenti danneggiate.*

*È interessante rilevare che Giovanni Poleni utilizzò, a metà del secolo, risultati desunti dall'attività di studiosi e sperimentatori contemporanei, soprattutto mediante la fitta corrispondenza con Musschenbroek, nonché di proprie esperienze appositamente istituite, non per le applicazioni alle nuove costruzioni ma proprio per il consolidamento di strutture esistenti, nello specifico quelle murarie della cupola di San Pietro. Egli impostò in modo scientifico la relativa problematica di analisi delle strutture portanti antiche, rilevazione e interpretazione delle manifestazioni di dissesto, erigendo in metodo la procedura che indica le attività indispensabili preliminari al consolidamento; attività speculative e strumentali che oggi si definiscono identificazione della struttura, determinazione del comportamento strutturale, analisi e decorso del dissesto e che permettono di formulare la diagnosi di questo.*

*Le vicende esposte si intrecciano con la lunghissima ricerca, argomento qui pure diffusamente analizzato, sulla interpretazione del comportamento delle travi, quelle di legno ovviamente che è il materiale resistente a trazione ed a compressione, sviluppando e perfino correggendo, ma senza smantellarla, l'impostazione che Galilei aveva dato nel secolo precedente.*

*Se ne consiglia la lettura sulla scorta di opere generali come quella di Edoardo Benvenuto su *La scienza delle costruzioni ed il sviluppo storico*, pubblicata da Boringhieri, più volte citata nel testo, dell'articolo di Massimo Corradi "Tra 'Philosophia naturalis' e 'Resistenza solidorum' " pubblicato sul n° 10-2003 del "Bollettino Ingegneri"; della *Piccola storia della scienza del costruire*, di Claudio Messina, pubblicata da Nerbini a Firenze nel 2009.*

**Gennaro Tampone**

## 1.1 Introduzione

Nel Seicento la meccanica acquisisce importanti scoperte allontanandosi gradualmente, sotto la guida di Galilei, dalla fisica aristotelica e dal ripetitivo riferimento alla leva di Archimede, usata da molti scienziati anche per spiegare fenomeni come quello della trave inflessa sotto l'azione di un carico ad essa perpendicolare<sup>1</sup>. Alla fine del secolo grandi matematici dai Bernoulli<sup>2</sup>, a Hooke, a Varignon fissano concetti e formule che aprono il campo a nuove intuizioni e soprattutto a sperimentazioni, gettando solide basi per l'attuale scienza delle costruzioni.

Il XVIII secolo diventa l'età dell'esperienza, tutto deve essere dimostrato e derivare in via prioritaria dall'osservazione, "...niente è più vantaggioso per la pratica che moltiplicare le esperienze..."<sup>3</sup>, le teorie, anche quelle più ingegnose, devono trovare riscontro e conferma nelle prove di laboratorio. L'interesse è rivolto principalmente alla trave caricata con diversi schemi statici e soprattutto si moltiplica l'attività di ricerca attorno al suo comportamento prima del collasso. Frequentemente è proprio il legno, di facile approvvigionamento e adatto ad ogni tipo di esame, ad essere utilizzato per diverse prove a rottura con le successive formulazioni matematiche, forse impropriamente, estese ai vari materiali usati nelle costruzioni; in Musschenbroek e Girard, invece, le sperimentazioni vengono effettuate con la specifica volontà di comprendere le caratteristiche resistenti e di deformazione del legno. Tutti i trattatisti, comunque, sono uniti nel riconoscimento unanime nei due naturalisti Henry Louis Du Hamel e Georges-Louis Leclerc De Buffon, quali massimi esperti di botanica quindi agli innumerevoli riferimenti (a Vivencio, Milizia, D'Alambert etc.) prendono come solido fondamento delle loro speculazioni scientifiche sul legno, gli studi di questi due accademici reali di Francia.

L'ardore nella ricerca che contraddistingue i due nobili Du Hamel e De Buffon si concretizza nella redazione di diversi trattati, alcune volte in collaborazione<sup>4</sup>, altre con studi indipendenti. Tali scritti riguardano la rappresentazione in generale del mondo vegetale e più in particolare delle caratteristiche d'anatomia del legno, i suoi difetti e, in maniera meno estesa, le proprietà meccaniche.



Fig. 1 Henri Louis Du Hamel du Monceau;



Fig. 2 George Louis Le Clerc De Buffon;

1. Edmè Mariotte (1620-1684), utilizza uno strano modello per descrivere il comportamento di una mensola inflessa, una leva con all'incastro elementi elastici distanziati in maniera diversa dal fulcro. Per lo stesso Galilei (1564-1642) diversi sono i tributi sia ad Aristotele, spiegando con l'impossibilità del vuoto la tenacità dei materiali ad essere fratturati, sia ad Archimede, nel riferirsi sempre alla leva nello studio della distribuzione delle tensioni in una mensola incastrata.

2. Si fa riferimento a Giacomo "...primogenito dei Bernoulli, nato in Basilea degli Svizzeri nel 1654 e morto professore di matematica in detta capitale nel 1705...il suo fratello Giovanni ... tra le produzioni... problemi di dinamica, il problema della catenaria... e una quantità innumerevole di altre ricerche..." (De Sallustj D. Giuseppe, 1846, *Storia dell'origine e de progressi delle matematiche di più autori*, Roma). Della stessa famiglia e di pari valore scientifico, ma operanti in pieno settecento, sono Niccolò e Daniele Bernoulli, figli di Giovanni e Nicolò Bernoulli figlio di Giacomo.

3. Henry Louis Du Hamel, 1770, *Experiences pour connoître la force des bois*, in *Histoire de l'Académie Royale des sciences Année M. DCCLXVIII. Avec les Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année*, Paris.

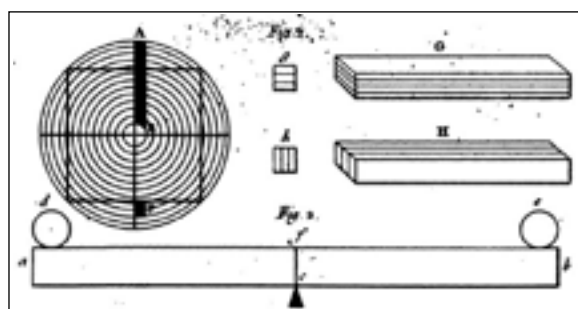
4. Il capitolo "Memoire sur la force du bois" appartenente a *Histoire Naturelle*, di De Buffon è scritto insieme a Du Hamel.

## 1.2 Anisotropia strutturale e omogeneità di materiale

Secondo i due naturalisti francesi, se si opera con una sezione trasversale sul fusto, chiara è la conformazione, i vari cerchi concentrici descrivono l'accrescimento di un anno di vita dell'albero e conseguentemente facilmente se ne può dedurre l'età. Un albero è composto da un gran numero di coni che si sviluppano con la crescita; tali strati, distintamente separati l'uno dall'altro, corrispondono, per De Buffon e Du Hamel, alla vegetazione di differenti periodi dell'anno. Ne risulta un'eterogeneità di composizione, in cui "...i cerchi di accrescimento hanno differenza di qualità..."<sup>5</sup>, con ad esempio in una quercia, "...lo spessore di ogni corona di una o due linee... è di un legno duro e solido, con la sostanza che unisce le corone la parte debole..."<sup>6</sup>.

Una mancanza di omogeneità dal punto di vista istologico<sup>7</sup> che si traduce in una variabilità di comportamento alle sollecitazioni di tipo strutturale a cui si aggiunge l'osservazione di una varietà di spessore dei cerchi annuali, anche tra alberi della stessa specie legnosa, con conseguente diversità di caratteristiche meccaniche.

**Fig. 3** In alto a sinistra è mostrata una sezione del tronco in cui si rilevano gli strati legnosi circolari solidarizzati da un tessuto meno denso. La "fig. 2" presenta uno degli schemi statici, due carichi concentrati alle estremità e appoggio in mezzzeria, utilizzato nelle numerose prove per indagare l'inflessione di una trave di legno; in "G" e "H" è evidenziata una disposizione della trave con inclinazione della fibratura diversa rispetto alla direzione del carico (da Du Hamel Du Monceau Henry Louis, 1767, *Du Transport de la conservation et de la force des bois*, Paris);



De Buffon, basandosi su tali intuizioni, avverte chiunque è interessato alle sperimentazioni sul legno che, campioni di piccole dimensioni possono comportare risultati diversi rispetto ad una trave reale, proprio per la presenza di un diverso numero e posizionamento di strati di legno e pareti (corone e suo collegamento con la successiva), infatti un campione con "...14 o 15 strati e 13 o 14 pareti...sarà meno forte di uno che ne conterà 5 o 6 strati e 4 o 5 pareti..."<sup>8</sup>; inoltre "...la posizione degli strati legnosi e delle pareti del campione è fortemente differente dalla posizione degli stessi strati di una trave reale e per conseguenza non si può stimare la forza di una trave reale sulla base di esperimenti su provini di piccole dimensioni..."<sup>9</sup>. Una problematica che i moderni strutturisti e ricercatori più accorti conoscono bene, tanto da riferirsi, per operare una netta distinzione, a legno per usi strutturali e quindi in condizione reali di impiego e legno netto, ovvero campioni di piccole dimensioni utilizzati in laboratorio privi di difetti<sup>10</sup>, con una diversità di resistenza e più in generale di comportamento meccanico in alcuni casi considerevole.

Altra differenza di materiale nello stesso fusto, si riscontra, sempre per De Buffon e Du Hamel, nel legno del piede dell'albero "...migliore di quello della cima o dei rami..."<sup>11</sup>. Una proposizione che viene avvalorata e confermata da diversi esperimenti compiuti da De Buffon, con legno proveniente dalla parte sommitale del fusto e legno tagliato al piede dell'albero; riferendosi, nel caso specifico, a una migliore resistenza dovuta alla maggiore durezza del legno<sup>12</sup>.

5. Du Hamel Du Monceau H.L., 1764, *De l'exploitation des bois*, Paris.

6. De Buffon, *Historie Naturelle*, 1749, in *Oevres completes De Buffon* di Duthilloeuil H.R., 1832

7. La consapevolezza di variabilità di resistenza tra legni appartenenti alla stessa specie legnosa caratterizzati da un differente numero di anelli o disposti rispetto la forza con angolo differente o con diverso grado di stagionatura etc. è riassunto in Du Hamel: "...puor faire une juste comparaison entre des bois de différents échantillons, que les pieces dont on veut comparer la force, foient de même âge, prises dans un même terrain, a una même exposition, abbatuens dans le même temps, parvenues à un égal degré de sécheresse, ayant un même nombre de couches de annuelles, quon place toujours dans un même sens quand un veut faire rompre les peices..." Du Hamel Du Monceau Henry Louis, 1767, *Du Transport de la conservation et de la force des bois*, Paris.

8. De Buffon, 1749, *Historie Naturelle*, Paris (op. cit.).

9. Ibidem.

E' osservabile sperimentalmente che per una trave di notevole volume si verifica una diminuzione della resistenza ideale a flessione rispetto ad una membratura di volume minore, un comportamento in cui è insito un concetto di probabilità (Vedi Teoria di Weibull): all'aumentare delle dimensioni della membratura accrescono le possibilità di riscontrare difetti e quindi elementi di scadimento di resistenza. L'attuale normativa, DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", considera tale particolarità meccanica, introducendo un coefficiente amplificativo della resistenza a flessione,  $K_v$ , per elementi strutturali di legno massiccio inferiori ai 15 cm. (Cfr. Effetto Volume/Size Effect in Tampone G., 1996, *Il Restauro delle Strutture di Legno*, Hoepli, Milano.)

10. I due termini legno netto e legno per uso strutturali, identificano rispettivamente, legno privo di difetti quindi con presenza di limitati nodi o assenza totale, fibratura regolare, mancanza di fenditure, etc. e legno con caratteristiche anatomiche riscontrabili nella realtà nel normale utilizzo. A tal riguardo sostanziale può essere la differenza di comportamento a flessione di legno appartenente alle due classificazioni: per legno netto la rottura avviene con corrugamento e plasticizzazione delle fibre compresse e conseguente collasso nella parte tesa; diverso per legno strutturale, dove l'eventuale presenza di nodi nella zona tesa può comportare rotture premature senza interessare totalmente la resistenza delle fibre compresse.

11. Du Hamel, 1764, *De l'exploitation*, Paris (op. cit.)

12. Tale concetto è intuito da Alberti: "...legnami...quanto uno è più leggero tanto è più fragile..." Alberti L. B., 1565, *L'architettura di Leon Battista Alberti* tradotta in lingua fiorentina, Francesco Franceschi, Venetia.

Il legno più duro, quindi con una densità maggiore, infatti risulta avere in generale caratteristiche meccaniche migliori di un legno con un peso specifico minore<sup>13</sup>. Tale concetto viene ripreso e sottolineato, tra gli altri, da Girard<sup>14</sup> e Girolamo Masi, parlando in questo caso, a differenza dei due botanici, in maniera esplicita di forza del legno e resistenza strutturale.

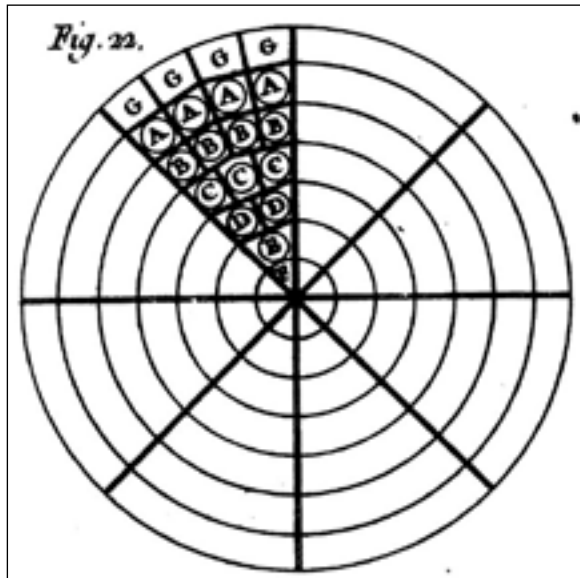


Fig. 4 Nella sezione trasversale del tronco, indicata in figura, lettere uguali individuano strati di legno della stessa età e con caratteristiche meccaniche simili, si evidenzia quindi, una variabilità della resistenza del legno in dipendenza della distanza del cuore dell'albero. (da Du Hamel Du Monceau Henry Louis, 1767, *Du Transport*, op. cit.) ;

Nel Settecento, ancora l'osservazione aveva fatto pienamente comprendere la presenza, se-

zionando in orizzontale il fusto, dell'alburno e del durame<sup>15</sup>, l'uno più esterno, vicino alla corteccia, meno durevole e resistente, l'altro il legno "...del cuore dell'albero, più denso e più resistente..."<sup>16</sup>. Musschenbroek effettuò numerosi esperimenti a tal proposito, dimostrando facilmente che "...il legno preso dal mezzo sostiene di più di quello lontano dal mezzo e con minore inflessione..."<sup>17</sup>. Una distinzione rilevabile anche per la diversità di colore che li caratterizza con "...l'alburno, una corona più o meno spessa, di legno bianco e imperfetto... e il cuore... legno perfetto, di differente colore e durata..."<sup>18</sup>.

Già Galilei distingueva nel legno le fibre<sup>19</sup> "...filamenti distesi per lungo...", a cui affidava il maggior compito strutturale riconoscendo quindi una certa anisotropia del legno nella risposta meccanica alle diverse sollecitazioni. Malpighi riferisce "...le fibre lignee che gli antichi chiamavano nervi o filamenti, sono corpi tubolari..."<sup>20</sup>, una definizione che contiene chiaramente un'accezione strutturale del termine. Le fibre legnose<sup>21</sup> sono proprio gli elementi deputati, durante la vita dell'albero prima, e successivamente come legno impiegato nelle costruzioni, a resistere nei confronti dei carichi esterni. Esse disponendosi lungo una direzione parallela al fusto, comportano un verso preferenziale di resistenza del legno, "...in una trave ci sono due direzioni una più vantaggiosa dell'altra. Se ponete la trave in posizione verticale resisterà di più che in posizione orizzontale..."<sup>22</sup>; tale affermazione<sup>23</sup> era come di consueto supportata da numerose sperimentazioni a riguardo compiute da De Buffon. La proposizione è esatta solo considerando la resistenza a

13. Alberti aveva già intuito che la forza del legno è proporzionale al suo peso. Si veda Di Pasquale S., 1996, *l'arte del costruire*, Venezia (op.cit.)

14. Girard P.S., 1798, *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance*, Paris.

15. Per alcune specie legnose tipo l'abete (Abies) ciò non è sempre vero e difficile risulta la distinzione tra il durame (anche duramen), parte di sostegno dell'albero che ha perso funzioni vitali e l'alburno, legno ancora che assolve le funzioni di conduzione e riserva, di produzione più recente.

16. Girard P.S., 1798, *Traité*, (op. cit.).

17. Van Musschenbroek Petri, *Physicae experimentalis et geometricae*, 1729.

18. De Buffon, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.).

19. Nel Seicento e per tutto il Settecento, gli scienziati che si occupavano di meccanica si riferivano genericamente alle fibre ed alla loro coesione per spiegare il comportamento strutturale di una trave soggetta ad un carico indipendentemente dal materiale di cui questa era costituita, come in Bernoulli citando Mariotte "...ils concurent de plus le corps solides une infinité de fibres...". Jacob Bernoulli, 1705, *Veritable hypothese de la resistance des solides, avec la démonstration de la courbure des corps qui son ressort, lettre du 12 Mars 1705, Histoire de l'Académie Royale des sciences*, in Jacobi Bernoulli, Basileensis, Opera, Tomus II, Cramer e Fratrum Philibert, Geneva 1744.

20. Malpighi M., 1687, *Opera Omnia seu thesaurus locupletissimus botanico-medico-anatomicus*.

21. Si distinguono rilevanti differenze anatomiche tra latifoglie e conifere: nelle latifoglie, cellule cilindriche, dette vasi, provvedono alla conduzione delle sostanze nutritive, mentre le fibre, fusiformi, hanno il compito di sostegno della pianta; nelle conifere invece, cellule fusiformi dette tracheidi, svolgono contemporaneamente le funzioni di sostegno e conduzione. Tuttavia i tecnologie del legno si riferiscono, sia per le fibre delle latifoglie, che per le tracheidi delle conifere, con il termine generico di fibre legnose. (CFR Piazza M., Tomasi R., Modena R., 2009, *Strutture in legno*, Hoepli, Milano)

22. De Buffon, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.).

23. La deduzione di De Buffon, che accenna ad una resistenza a trazione elevata del legno, dimostra una conoscenza approfondita di Galilei che nella 2ª giornata dei *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche sopra due Nuove Scienze*, 1638 scrive "...la resistenza dei corpi solidi all'essere spezzati...la quale, benché grandissima contro alla forza di chi per diritto gli tira, minore per lo più si osserva nel violentargli per traverso...". Per Girard, qualche anno più tardi, il concetto è totalmente chiarito "...les mêmes solides résistant avec beaucoup plus de force parallèlement que perpendiculairement a leur longueur..." Girard, 1798, *Traité* (op. cit.).

trazione del legno, se invece la sollecitazione è di compressione non tiene in debita considerazione ciò che Leonardo e Musschenbroek<sup>24</sup> avevano intuito ed Eulero qualche anno dopo avrebbe in maniera più precisa formulato, l'eventualità, per una membratura soggetta a compressione assiale, se superato un certo limite di altezza di sezione, di pericolo d'instabilità.

De Buffon interviene ancora sull'ortotropia<sup>25</sup> del legno, "...vedendo che la coerenza longitudinale è più considerevole che l'unione trasversale..."<sup>26</sup>, un aspetto ripreso e riaffermato qualche anno più tardi da Milizia e Masi "...per lunghezza la fibra del legno è più resistente che per larghezza..."<sup>27</sup>, introducendo in tal modo un nuovo elemento ovvero la resistenza a trazione perpendicolare alle fibre; tale tensione alcuni autori<sup>28</sup> consigliano di rendere minima nel progetto di nuove strutture.

### 1.3 Difetti

I "difetti", in generale, sono presenti nel legno e legati ad esigenze funzionali della pianta; altre volte, invece, sono causati da particolari situazioni ambientali come il vento, la neve, etc. Tali irregolarità, in determinate condizioni ed in dipendenza della direzione e tipo di sollecitazione agente, possono divenire detrattori considerevoli della capacità resistente del legno e modificarne il comportamento a rottura.

Il gelo e le sue conseguenze sono il problema maggiormente approfondito dai trattatisti del '700<sup>29</sup>: il ghiaccio ed in particolare l'alternanza di temperatura, riferisce De Buffon, provocano fessure nel legno che seguono la direzione degli

anelli; la causa è l'aumento di volume della linfa solidificata a basse temperature, un fenomeno, chiamato "gélivure", amplificato dalla fatica risultata di variazioni di temperature e quindi di stato della linfa, nelle diverse ore della giornata. Una variante a tale difetto e riconducibile secondo De Buffon al gelo, è denominato "gélivure entrelardée", rappresentato dalla formazione di legno scadente, privo di sostanze vitali, ricoperto, all'interno, di legno dalle normali caratteristiche fisico-meccaniche. Si tratta di un albero, quello che presenta tale vizio, con presenza di una corona anche intera "...di legno imperfetto riempito e ricoperto di legno buono...il falso alburno è più leggero e più tenero...(la causa è il gelo che)...interrompe il movimento laterale della linfa...e (l'albero) non può più vegetare..."<sup>30</sup>. Anche Du Hamel<sup>31</sup> interviene sull'argomento, riconducendo le "gélivures" all'azione congiunta del vento, che separa gli anelli, con conseguente penetrazione dell'acqua ed alterazione del legno, e le forti gelate; il "falso alburno" può essere ricondotto, oltre che alle basse temperature anche all'azione continua del vento del nord. Prove a rottura compiute su travi di piccolo spessore hanno dimostrato la minore resistenza del legno con presenza di "gélivure entrelardée", rispetto a legno in normali condizioni<sup>32</sup>.

Francesco Milizia<sup>33</sup> propone quasi pedissequamente, citando i due autori, le osservazioni sul fenomeno del "falso alburno" riferite dai due accademici di Francia, causato secondo Milizia dall'impeto dei venti, dal peso delle nevi e dalle brine.

Girolamo Masi<sup>34</sup> tratta del difetto "gélivure", traducendo in "diacciuolo", assimilandolo, in

24. Benvenuto E., *La scienza delle costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Firenze 1981.

25. In realtà sono tre le direzioni a cui dovrebbe essere fatto riferimento per caratterizzare le sollecitazioni nel legno, radiale, longitudinale e trasversale, anche se con un'ulteriore semplificazione, l'attuale normativa, *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni DM 14/1/2008*, compendia solo due direzioni, parallela e perpendicolare alla fibratura, considerando il materiale come ortotropo.

26. De Buffon, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.).

27. Masi G., 1788, *Teoria e pratica di Architettura civile*, Roma.

28. Piazza M., Tomasi R., Modena R., 2009, *Strutture*, Milano (op. cit.). Il legno infatti presenta ridotti valori di resistenza meccanica a sollecitazioni di trazione perpendicolare alle fibre.

29. Ciò è facilmente spiegabile con l'ambiente di attività dei due maggiori botanici del periodo, la Francia del nord; non erano rare a queste latitudini grandi gelate in diversi periodi dell'anno come ad esempio racconta De Buffon nel 1709: "...des grandes gelées d'hiver, qui ont fait entièrement périr une portion d'aubier e d'écorce..." , De Buffon, 1749, *Histoire*, Paris.

30. Du Hamel Du Monceau H.L., 1758, *La Physique des arbres*, Paris.

31. Du Hamel, 1764, *De l'exploitation des bois*, Paris.

32. De Buffon Louis Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.).

33. "...stravolgimento o slogamento del legno è quella fessura o apertura continuata che seguita la direzione degli anelli o degli strati annuali e forma tra loro un vano circolare concentrico che li disunisce...talvolta non si vede che una corona di legno vivo circondare un nocciolo di legno morto...Quando la corona o la fascia del doppio alburno non cinge tutta la circonferenza di un albero chiamasi diacciuolo lordato..." Milizia, *Principi*, Bassano 1785 (op. cit.).

34. "...diacciuolo è ogni fessura che dal centro di un albero si estende alla circonferenza e suole ordinariamente essere prodotto da forti diacci...la stellatura o radiatura nel cuore dell'albero a guisa di raggi...diminuiscono di molto la sua forza..." Masi, 1788, *Teoria*, Roma.

maniera errata, ad un altro difetto del legno, la presenza di spaccature trasversali nel durame, dovute a cause completamente diverse ed esposte, al solito, con minuzia di particolari da De Buffon. Il legno in questo caso mostra le fessure che si dispongono in una sezione orizzontale del fusto come "...un quadrante di un orologio..."<sup>35</sup>, lesioni con andamento dal cuore verso l'alburno; probabilmente il difetto è quello che i tecnologi del legno oggi definiscono "Brittle Heart", cuore fragile<sup>36</sup> dovuto, in piedi, ad un superamento delle caratteristiche di resistenza a compressione alla base del fusto di pianta vecchia a causa del peso proprio dell'albero, che si traducono in lesioni minute. Il legno proveniente da alberi con tale vizio è di pessima qualità.

I nodi<sup>37</sup> rappresentano il risultato della presenza di rami nell'albero<sup>38</sup>, per Du Hamel, questi "...rendono il legno più pesante..."<sup>39</sup>, esprimendo "in nuce" la consapevolezza di discontinuità di materiale e di rigidità, dovuta ad una massa volumica differente tra il legno appartenente al fusto e i nodi. Inoltre, sempre Du Hamel formula una distinzione tra diversi tipi di nodi basandosi sulle caratteristiche di forma, denominando "*Yeux de boeuf*" quello che per conformazione rimanda ad un occhio di bue, in cui la presenza di funghi causa il suo deterioramento con formazione di cavità.

Nel '700 chiara era l'influenza dei nodi sul comportamento meccanico del legno, riconoscendo in questi la causa di uno scadimento di resistenza<sup>40</sup>. A questo riguardo Girard effettua numerose esperienze su campioni di legno con presenza di nodi e osserva "...la minore resistenza che presenta quel campione comparata alla precedente prova (legno con fibratura dritta) che le fibre dritte sono alterate per la posizione di

*un nodo...*"<sup>41</sup>, introducendo un nuovo elemento all'analisi anatomica del legno, le fibre si adattano alla presenza del nodo puntualmente deviano dalla rettilinearità.

La fibratura deviata riferita all'intero fusto, ovvero le fibre del legno inclinate rispetto alla direzione assiale, è descritta da Du Hamel<sup>42</sup> come un difetto, sottolineando che l'irregolarità delle fibre comporta una difficoltà nella lavorazione per i vari usi quindi un legno affetto da tale vizio risulta di poco valore.

Du Hamel elenca, tra i vari difetti riscontrabili nel legno, anche la cipollatura, conseguenza dell'azione continua del vento combinata alla differenza di resistenza tra il legno tardivo e quello primaverile, con conseguente distacco tra gli anelli.

Girard esegue prove con legni caratterizzati da fibratura deviata, evidenziandone un comportamento a rottura singolare e la resistenza minore rispetto a campioni netti.

#### **1.4 Stagionatura e altre procedure per rendere il legno più resistente**

Il risultato di diverse esperienze porta De Buffon<sup>43</sup> a comprendere la necessità della stagionatura<sup>44</sup> al fine di rendere il legno più adeguato a resistere ai carichi ed all'utilizzo più in generale. Immediatamente dopo il taglio, allo stato fresco, il legno inizia a perdere acqua, con desorbimento di liquidi dalle pareti cellulari, tendendo naturalmente a portarsi in equilibrio igrometrico con l'ambiente circostante, mostrando un comportamento igroscopico, ed è "...più umido quando l'aria è più umida e meno umido quando l'aria è più secca e risente del tempo della pioggia che del bel tempo..."<sup>45</sup>.

35. De Buffon Louis Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.)

36. Tampone G., 1996, *Il Restauro* (op. cit.)

37. Alberti aveva compreso che la presenza di nodi in misura elevata portasse ad uno scadimento del legno e consiglia di "...molto schifare le travi nodose e massimo se i nodi saranno spesi e aggruppati in un monte...". Alberti L.B., 1565, *L'Architettura*, Venetia (op. cit.)

38. "...i nodi sono prodotti dai rami...", Malpighi, 1687, *Opera Omnia*, Lugduni Batavorum.

39. Du Hamel, 1764, De l'exploitation, Paris (op. cit.). Milizia prendendo spunto dalle osservazioni di Du Hamel descrive in nodi come "...specie di cavicchie aderenti all'interno del legno..." Milizia, 1785, *Principi*, Bassano (op. cit.)

40. L'influenza dei nodi sulle caratteristiche di resistenza del legno è fortemente influenzata dalla posizione del nodo e dalla tipologia di sollecitazione agente. A compressione, la densità maggiore, comporta addirittura un aumento di resistenza; mentre per sollecitazioni di trazione, sia assiali (parallele alle fibre), che trasversali (perpendicolare alle fibre), il nodo provoca una rottura prematura. Ne deriva che in una membratura soggetta a flessione, la presenza di un nodo in zona tesa, è conseguenza di una diminuzione importante di resistenza.

41. Girard P.S., 1798, *Traité analytique*, Paris (op.cit.)

42. Du Hamel Du Monceau H.L., 1758, *La physique des arbres*, Paris.

43. De Buffon Louis Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.)

44. Già Alberti, per i diversi utilizzi del legno, consigliava un sufficiente tempo di essiccazione: "...Teofrasto si pensa che i legnami non siano ben secchi da farne Asse e massimo per Porte, innanzi a tre anni...". Alberti, L.B., 1565, *L'Architettura*, Venetia (op. cit.)

45. De Buffon Louis Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.)

Se De Buffon accenna alla contrazione di volume del legno stagionato<sup>46</sup>, nessun riferimento è dato riguardo la variabilità di tale ritiro secondo le direzioni radiale, tangenziale ed assiale e la conseguenza inevitabile di formazione di fenditure<sup>47</sup>; solo alla fine del '700 Milizia con un certo rigore esprime "...Le fenditure si formano nel legno, a misura che si dissecca...in larghezza (il legno) ritira e cresce secondo le stagioni, in lunghezza non fa moto sensibile..."<sup>48</sup> ammettendo anche una certa variabilità di dimensione dovuta all'umidità ed alla temperatura dell'ambiente.

De Buffon illustra, supportato come di consueto da innumerevoli sperimentazioni, la variazione di densità conseguentemente di resistenza, del legno correttamente stagionato rispetto a quello appena tagliato. Un'essiccazione con diminuzione di peso, che varia in dipendenza delle varie zone del fusto, "...l'alburno della quercia si stagiona più che il cuore, la ragione è nella densità relativa che è circa 1/15 rispetto al cuore..."<sup>49</sup>; inoltre intuisce che il tempo di essiccazione è inversamente proporzionale alla superficie del manufatto da stagionare, infatti "...un pezzo di legno di volume uguale e di superficie doppia di un altro (stagiona in un tempo) due o tre volte minore..."<sup>50</sup>.

Le procedure per una corretta stagionatura sono elencate da De Buffon, descrivendo un'essiccazione che può avvenire sia con l'esposizione al sole che all'ombra, accennando anche alla possibilità di essiccazione artificiale mediante un forno riscaldato. A tal riguardo, Milizia consiglia, per accelerare l'utilizzo del legno dopo il taglio di "...riscaldarlo a poco poco nelle stufe o nella sabbia calda..."<sup>51</sup>, inoltre sempre per il trattatista due anni è il tempo sufficiente per una regolare stagionatura.

Un artificio interessante, praticato da De Buffon in Francia nelle foreste reali e derivante da sperimentazioni compiute da diversi autori<sup>52</sup>, è il "bois ecorcé". Tale procedura consiste nello scortecciare in piedi l'albero dall'alto e lasciare

seccare interamente prima dell'abbattimento, ne risultano così preziosi vantaggi in termini di resistenza. La causa dell'aumento di "forza" e di solidità è che "...gli strati addizionali di nuovo legno che si formano (dopo lo scortecciamento)...(sono) a tutto vigore; la corteccia dei nostri alberi non formano punti di questi nuovi strati..."<sup>53</sup>. Per De Buffon lo scortecciamento in piedi comporta anche un aumento della durabilità del legno.

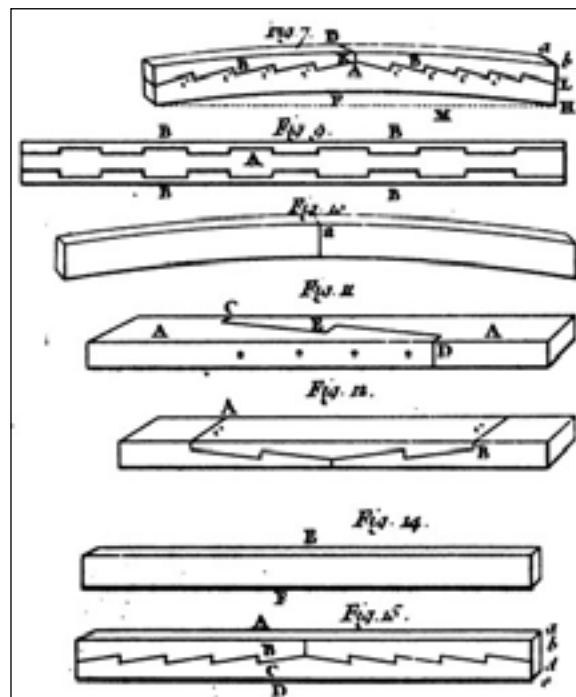


Fig. 5 Travi assemblate con diverse tipologie e dimensioni di indentature (da Du Hamel Du Monceau Henry Louis, 1767, *Du Transport*, op. cit.) ;

Du Hamel<sup>54</sup> indaga sulla possibilità di aumentare la resistenza di membrature di legno. Dopo aver compreso che la tensione massima sopportabile di compressione è minore di quella di trazione, propone di migliorare la "forza", per una trave inflessa, sostituendo la parte superiore compressa con legno di migliori caratteristiche

46. "...Que le bois de chêne perd environ un tiers de son poids par le desséchement, et que le bois moins solides que le chêne perdent plus d'un tiers de leur poids..." Ibidem

47. L'essiccazione del legno provoca deformazioni che a causa dell'anisotropia dei ritiri lungo le diverse direzioni del fusto comporta la formazione di fenditure. Il ritiro tangenziale è infatti, circa il doppio di quello radiale, ciò si esplica con una distensione degli anelli di accrescimento e conseguenti fisiologiche rotture. Lungo la direzione assiale il ritiro è trascurabile.

48. Milizia F., *Principi di Architettura*, 1785, Bassano (op. cit.)

49. De Buffon L. Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.).

50. Ibidem.

51. Milizia F., 1785, *Principi*, Bassano (op. cit.)

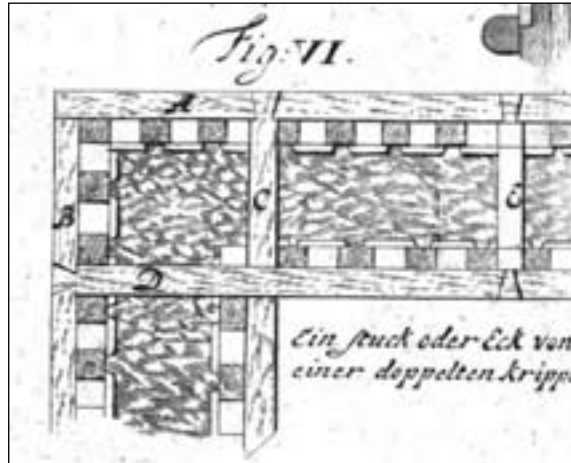
52. "...que le docteur Plot assure, dans son histoire naturelle, qu'autour De Haffon en Angleterra, on écorce les gros arbres sur pied dans le tems de la sève, qu'on laisse sécher jusque dans l'hiver suivant...que les bois en devient bien plus dur..." De Buffon Louis Le Clerc, *Historie*, Paris 1749 (op.cit.).

53. De Buffon Louis Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op.cit.)

54. Du Hamel Du Monceau H.L., 1780, *Du Transport, De la conservation et De la force des Bois*, Paris.

meccaniche; ne risulta una vera e propria struttura mista, costituita da due materiali diversi solidali attraverso indentature di Leonardiana<sup>55</sup> memoria. Numerosi sono gli esperimenti svolti da Du Hamel con l'obiettivo di ottimizzare il sistema, variando sia il numero di elementi utilizzati nella parte superiore della trave ma anche in quella inferiore, che, impiegando specie legnose con diverse caratteristiche meccaniche. Altre prove riguardano la dimensione ed il grado di profondità dei denti di collegamento al fine di scongiurare la rottura del dente del componente superiore. L'utilizzo delle "armures"<sup>56</sup>, comporta un lieve miglioramento delle caratteristiche di resistenza e diminuzione della deformazione prima del collasso, ma soprattutto la possibilità di giuntare diversi pezzi di legno per comporre un elemento strutturale di dimensioni maggiori, "le difficoltà di trovare legno ci ha messo di fronte alla necessità di utilizzare legni corti per realizzarne lunghi...l'esperienza insegna che questi assemblaggi sono tanto forti quanto un solo pezzo..."<sup>57</sup>. Il sistema misto di Du Hamel, insieme alle conoscenze fisiche sul legno, eserciteranno una notevole influenza sugli scienziati del XVIII° secolo, come ad esempio in Milizia che in maniera dettagliata descrive il modo di procurare "...al legno una forza artificiale di quella che naturalmente ha..."<sup>58</sup> e in maggiore misura in Vivenzio<sup>59</sup>. All'indomani del terribile terremoto che colpì la Calabria e la Sicilia nel 1784, Vivenzio, su incarico del governo borbonico, redige il suo sistema costruttivo di legno resistente ai terremoti, senza riferire alcuna indicazione circa i fondamenti scientifici della "casa baraccata", "...quest'arte di costruire riposa interamente sulle verità che si dimostrano nella Meccanica e nella Statica...cosa che ci obbligherebbe ad analizzare la natura degli alberi e di riferire il risultato di un infinito numero di esperienze fatte dai più grandi filosofi del nostro secolo e principalmente da Du Hamel Du Monceau..."<sup>60</sup>.

Il sistema strutturale antisismico<sup>61</sup> è costituito da telai lignei, con irrigidimenti composti da elementi disposti "a croce di sant'andrea". La diminuzione di massa sismica, dovuta al basso peso specifico del legno unita a limiti imposti nell'altezza dei fabbricati e a una distribuzione in pianta con simmetria biassiale rendono il sistema particolarmente efficace nel contrastare azioni di tipo dinamico. I telai di legno, nei disegni di Vivenzio vengono descritti come elementi verticali, pilastri continui e di lunghezza



**Fig. 6 Doppia intelaiatura con elementi trasversali di collegamento (diatoni) e nodi del tipo a coda di rondine, non si rilevano ferramenti aggiuntivi. Tale struttura risulta simile a quella proposta da Vivenzio successivamente al terremoto che colpì la Calabria e la Sicilia nel 1783 (da Leupold J., 1726, *Teatrum pontificiale*, Leipzig);**

elevata, quindi di difficile approvvigionamento che possono essere giustificati solo se il riferimento è il sistema di assemblaggio illustrato da Du Hamel. L'intelaiatura sismo resistente, proposta da Vivenzio, trova molti elementi in comune con un sistema costruttivo per la realizzazione di ponti, descritto da Leupold che presenta l'identica doppia orditura di telai con collegamenti a "coda di rondine" e riempimento interno irrigidente di materiale e composizione non specificata.

55. Tale trave disegnata da Leonardo nel Codice Atlantico Folio 49 verso -b., consisteva in due o più elementi sovrapposti con indentature di collegamento che, all'atto del caricamento, mediante lo scorrimento dei denti causato dalle tensioni tangenziali, entravano in forza solidarizzando i due elementi altrimenti separati. Si veda Tampone G., 1996, *Il Restauro*, Milano (op. cit.). Altri disegni riferiti a travi composte e a dispositivi per prove di carico sono illustrate da Leonardo in MS A, fol. 51 recto; Cod Atlant., fol 344 verso-a; Cod. Atlant. Fol. 324 verso; alcune di queste membrature presentano una curvatura ("monta"), tutte le travi composte, escluso quella raffigurata in MS A, fol. 51 recto, sono caratterizzate oltre che da indentature anche da pioli trasversali di collegamento che ne migliorano la solidarietà.

56. Du Hamel si riferisce a "meche" per indicare gli elementi inferiori, "armures" per quelli superiori. Du Hamel Du Monceau H.L., 1780, *Du Transport*, Paris (op. cit.).

57. Ibidem

58. "...se dunque potesse togliersi quella parte che in una grande inflessione va ad essere troppo compressa, il legno sarebbe più forte. Riflettendo su di ciò M. Du Hamel Du Monceau, ha procurato al legno una forza artificiale maggiore di quella che naturalmente ha. Questo artificio consiste nel tagliare il legno in mezzo fino al terzo di profondità, e incastrare nella sezione un cuneo di quercia o di altro legno..." Milizia F., 1785, *Principi*, Bassano (op. cit.)

59. Si veda Barucci C., 1990, *la casa antisismica. Prototipi e brevetti*, Reggio Calabria e Ruggieri N., 2004, la casa antisismica, in Atti del convegno Conservation of Historic wooden structures, Firenze.

60. Vivenzio G., 1788, *Istoria de Tremuoti*, Napoli.

61. Ruggieri N., 2004, *la casa*, Firenze (op. cit.)



## 1.5 Durabilità

Nel XVIII° secolo<sup>62</sup> limitato risulta essere l'interesse relativo alla durabilità del legno ed alla sua potenziale attaccabilità da parte di agenti biotici in determinate condizioni.

Malpighi e De Buffon, in particolare, illustrano minuziosamente patologie e rimedi di malattie degli alberi dovuti ad insetti, parassiti, come cantaridi, afidi, maggiolini etc., senza alcun riferimento a degradazioni del legno causate da agenti saprofiti, funghi e insetti xilofagi.

Du Hamel accennando alla maggiore alterabilità dell'alburno rispetto al durame, descrive senza averne bene inteso le cause un attacco da funghi osservando che il legno si trasforma "...in una polpa friabile...", un fenomeno che dipende dalla presenza elevata di umidità nel legno.

Giovanni Arduino<sup>63</sup> riferisce di legni totalmente immersi sott'acqua<sup>64</sup> e quindi in regime igrometrico costante con imbibizione totale del materiale, come poco vulnerabili ad attacchi biotici, anche se avverte che le acque marine possono celare un altro pericolo, le teredini, "...perniciosi vermi marini..."<sup>65</sup> che traforano il legno.

Anche Milizia riprende le argomentazioni precedenti, "...sotto acqua i legni si conservano benissimo, come si osserva nell'arsenale di Ve-

nezia e a Pozzuoli nel porto di Caligola..."<sup>66</sup>, aggiungendo elementi e descrizione di utensili di diagnostica<sup>67</sup> del degrado biotico: "...ferro puntito..."<sup>68</sup> e succhiello risultano essere necessari al fine di sondare sotto lo strato superficiale il legno, verificarne l'avanzamento dell'attacco biotico e conseguentemente la sezione resistente residua; inoltre, se i legni battuti col "...martello non rendono un suono forte e vivo..."<sup>69</sup> è indizio di materiale dalle scadenti qualità meccaniche, un principio che si ritrova nei moderni strumenti di diagnostica attraverso la generazione di ultrasuoni nel campione di legno da esaminare<sup>70</sup>. Il trattatista avverte che la presenza di corteccia, negli elementi di carpenteria, comporta una degradabilità maggiore; lo strato superficiale dell'albero, ricco di sostanze zuccherine diventa infatti un formidabile elemento di attrazione, per legno tagliato, di insetti xilofagi.

Masi interviene sulla durabilità suggerendo di lasciare un vuoto all'estremità della trave "...per cui entrasse l'aria a rinfrescare i legnami..."<sup>71</sup>, in tal modo vengono evitate le condizioni igrometriche favorevoli a consentire l'innescarsi di un attacco biotico; di diverso avviso è Milizia che precisa un metodo per preservare il legno e renderlo maggiormente durabile, fasciando le estremità delle travi con lamine di piombo e abbrustolendole<sup>72</sup>.

62. Le prime indicazioni di degrado biotico, in particolare sulla minore degradabilità dovuta ad insetti, di alcune specie legnose, vengono date da Vitruvio nel Liber secundum, caput nonum: "... cupressso et pinu, quod eae habentes umoris abundantiam eaqueque ceterorum mistione, propter umores satietatem in operi bus solent esse pandea, sed in vetustatem sine vitii conservantur, quod is liquor, quo inest penitus in corporibus earum, habet amarum saporem qui propter acritudinem non patitur penetrare cariem neque eas bestiolas quae sunt nocentes. Ideoque quae ex his generi bus opera constituuntur, permanent ad aeternam diuturnitatem..." Vitruvio Marco Pollione, *De Architectura*, I sec. d.C.

63. Arduino G, 1770, in "Giornale d'Italia", Venezia.

64. Vitruvio nel Liber secundum, caput nonum, descrive le palificate di legno, ad esempio a Ravenna, come elementi strutturali con alta durabilità, addirittura eterni: "... Itaque in palustri bus locis infra fundamenta aedificiorum palationibus crebe fixa, recipiens in se quod minus habet in corpore liquoris, permanet immortalis ad aeternitatem et sustinet inmania pondera structura et sine vitii conservat. Ita quae non potest extra terram paulum tempus durare, ea in umore obruta permanet ad diuturnitatem. Est autem maximum id considerare Ravennae, quod ibi omnia opera et publica et privata sub fundamentis eius generis habeant palos..." Vitruvio Marco Pollione, *De Architectura*, I sec. d.C.

65. Arduino G, 1770, in "Giornale", Venezia (op. cit.).

66. Milizia, *Principi di Architettura*, Bassano 1785 (Op. cit.).

67. Alberti precorre l'utilizzo del suono come strumento di diagnostica delle travi di legno "...Posto l'orecchio a l'una delle teste d'essa, se percossa più volte dall'altra riceverai le percosse sorde e ottuse; sarà inditio che dentro ui sia alcosa infermitate..." Alberti L.B., 1565, *L'Architettura*, Venetia (op. cit.).

68. Milizia F., 1785, *Principi*, Bassano (Op. cit.).

69. Milizia F., 1785, *Principi*, Bassano (Op. cit.).

70. Onde elastiche percorrono il provino di legno e grazie ad un trasduttore all'estremità opposta vengono registrate eventuali soluzioni di continuità o differenze in generale di materiale nel mezzo attraversato.

71. Masi G., 1788, *Teoria*, Roma (op. cit.).

Accorgimenti per permettere la circolazione dell'aria tra le membrature lignee e in particolare all'appoggio in muratura e quindi scongiurare condizioni di umidità ideali per aggressioni di tipo biotico, sono teorizzati dall'Alberti e attuati da Vasari nel Salone dei Cinquecento, dove i nodi di estremità delle capriate, di sostegno al cassettonato dipinto, sono distanziati dalla muratura e aerati da grate poste all'esterno della parete (Tampone G, 1996). Sia Alberti che Vasari, recepiscono suggestioni provenienti dalla lettura di Vitruvio "...trabes compactiles...ita sint compactae subscudibus et securielis ut compactura duorum digitorum habeant laxationem cum enim inter se tangunt et non spiramentum et perflatum venti recipiunt concalefaciuntur et celeriter putrescunt..." (Vitruvio Marco Pollione, *De Architectura*, I sec. d.C., Liber quartum caput VII)

72. Un chiaro tributo a Vitruvio, quello di abbrustolire le estremità delle travi. Tuttavia tali rimedi non sono completamente corretti: le lamine di piombo, possono formare condensa all'interfaccia metallo-legno e creare presupposti di umidità favorevoli per un attacco biotico (Tampone G, 1996); l'abbrustolire, in ugual misura, non risulta un efficace preservativo date le caratteristiche intrinseche del legno di risentire delle condizioni igrometriche ambientali con formazione di fenditure e più in generale di movimenti che realizzano nuovi fronti di penetrazione per insetti xilofagi.

Masi sconsiglia un uso eccessivo del legno, “...essendo soggetto al tarlo ed alla putrefazione...”<sup>73</sup> una posizione totalmente opposta di chi come De Buffon possedeva una conoscenza approfondita e che gli permetteva di affermare di rinunciare ad effettuare sperimentazioni sulla durabilità perché ciò “...non è possibile fare per la nostra breve vita...”<sup>74</sup>, attribuendo al legno un’alta durabilità.

## 1.6 Le tensioni

Nel corso del ‘600 sono diversi gli autori che dissertano intorno al comportamento a flessione<sup>75</sup> di una trave caratterizzata da diversi schemi statici, un’interpretazione che viene data generalmente attraverso l’uso delle proporzioni data la mancanza di conoscenza di procedimenti algebrici. Nel 1620 Isaac Beeckman aveva intuito che le fibre di una trave incastrata soggetta a flessione sono tese sul lembo superiore e compresse su quello inferiore (Benvenuto E., 1981); anche se la distribuzione delle tensioni in una trave appoggiata era un concetto di cui già Alberti era a conoscenza (Tampone G., 1996). Bernoulli, in uno scritto pubblicato dall’Accademia di Francia<sup>76</sup>, citando Galilei, Leibnitz e gli assunti di Mariotte circa l’asse neutro, interviene sullo studio dell’inflessione di un solido incastrato caricato all’estremità libera<sup>77</sup>, osservando la presenza di un “punto” in mezzera “...qui ne souffre ni extension ni compression...”<sup>78</sup>.

Tali enunciazioni Du Hamel può osservare e provare attraverso numerosi esperimenti effet-

tuati su travi di legno con appoggi alle estremità e carico in mezzera e variante, considerando due forze all’estremità e appoggio al centro dell’elemento strutturale; prove che effettua al fine di comparare la resistenza delle travi composte con membrature di un solo elemento, sotto diverse condizioni.

Musschenbroeck<sup>79</sup>, riprendendo la terminologia Galileiana, definisce le tensioni come assolute e relative, riconducendo i problemi di meccanica ad una forza assiale secondo la lunghezza della trave, principalmente trazione,<sup>80</sup> e a carichi agenti perpendicolarmente all’elemento strutturale, quindi flessione. A queste tensioni il legno, grazie “...al glutine che riempie le cavità e i canali...”<sup>81</sup> risponde con la “coerentia”, ovvero l’attitudine di un corpo e del legno in particolare, a deformarsi senza collassare. Tale opposizione a seconda se il corpo esercita una resistenza assialmente o a flessione, viene definita sempre da Musschenbroeck, rispettivamente, come “coerentia absoluta e coerentia respectiva”.

Anche Du Hamel<sup>82</sup> descrive la “coerenza” di un corpo, imputando a questa attitudine degli strati lignei, l’aderenza tra le fibre quindi la resistenza a flessione sia per una trave di legno che per una composta, in particolare per quest’ultima riferisce che “...più le indentature (di collegamento) sono profonde, più la coerenza è maggiore...”<sup>83</sup>, precorrendo il concetto di tensione tangenziale che solo più tardi con Coulomb (Benvenuto E., 1981), verrà sistematicamente definito. Una deduzione confermata in una tavola disegnata da Du Hamel dove una trave composta da 4 ele-

73. Masi G., 1788, *Teoria*, Roma (op. cit.)

74. De Buffon L. Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op. cit.)

75. Galilei ipotizza, per una mensola, una leva con il fulcro collocato sul lato inferiore della base dell’incastro. La resistenza a flessione è inversamente proporzionale alla lunghezza e direttamente proporzionale al quadrato della base.

76. Jacobi Bernoulli, 1705, Paris, *Veritable hypothese*. (op. cit.)

77. “...la même force...en étendant une partie de ses fibres de la quantité du triangle BSF, e comprimant l’autre de la quantité du triangle ASG...”. Ibidem.

Bernoulli intuisce così, correttamente, la presenza di una coppia resistente che si oppone al momento causato dal carico esterno. Tuttavia, da un punto di vista numerico, assume erroneamente, nella deformazione di una trave elastica, un’asse di rotazione (una “leva resistente”) all’intradosso dell’elemento strutturale, considerando solo le elongazioni e quindi unicamente la trazione nel calcolo della forza resistente. (Cfr Timoshenko, S., 1953, *History of Strength of Materials*, Mc Graw-Hill Companies, New York).

78. Ibidem. Tale affermazione viene riportata anche da Viviani “...un punto di mezzo che non soffre veruna compressione o stendimento alcuno come appare da una lettera di Jacopo Bernoulli del 1705 all’Accademia Reale di Francia...”, Viviani, 1718, *Della resistenza principata da Viviani per illustrare l’opera di Galilei*, Firenze.

79. Musschenbroeck Petrus Van, 1745, *Institutiones physicae conscriptae in usus academicos*, Venetiis.

80. Galilei era già conscio del fatto che il legno oppone grande resistenza se sollecitato a trazione lungo il suo asse: “... così nel legno si scorgono le sue fibre e filamenti distesi per lungo, che lo rendono grandemente più resistente allo strappamento...” Galilei G., 1638, *Discorsi*, (op. cit.)

81. Musschenbroeck, 1745, *Institutiones*, Venetia (op. cit.); tale vocabolario è ancora una volta un tributo a Galilei: “...glutine, visco o colla che tenacemente colleghi le particole delle quali esso corpo è composto...”, Galilei G., 1638, *Discorsi*, (op. cit.). A tal proposito scrive De Saint Venant in appendice al testo di Navier, *Résumé des leçons*, che i precursori della meccanica molecolare sono stati Newton e Boschovich, i quali per primi parlarono di attrazione e repulsione in tutte le combinazioni della materia; anche Knight, nel 1743 s’interessò all’interpretazione della coesione dei corpi, imputandola correttamente alla forza d’attrazione degli atomi.

82. Du Hamel Du Monceau H.L., 1780, *Du transport*, Paris (op. cit.)

83. Ibidem.

menti, inflessa sotto carico, mostra chiaramente gli scorrimenti provocati dalle tensioni tangenziali di ciascun componente rispetto al contiguo, alle estremità.

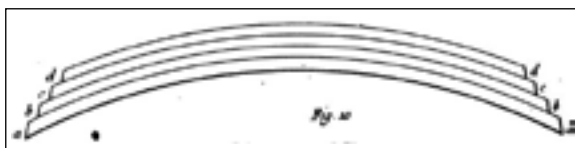


Fig. 7 Scorrimento degli strati lignei sotto carico (da Du Hamel Du Monceau Henry Louis, 1767, *Du Transport*, op. cit.);

Un concetto, quello che la flessione si accompagna a tensioni agenti tra le fibre longitudinali, ripreso successivamente da Girard. Il matematico francese, supportato da numerose esperienze su campioni di legno, attribuisce errori alle teorie sulla resistenza a flessione dei solidi di Galilei e Leibnitz, proprio per la mancata considerazione della coerenza longitudinale "...che si oppone al movimento delle fibre che sono sollecitate e rendono l'inflessione più difficile..."<sup>84</sup>; l'aderenza tra le fibre, ovvero l'insorgere di tensioni tangenziali nel caso in cui la flessione è accompagnata dal taglio, contrasta quindi la rottura dell'elemento strutturale.

Du Hamel, al solito attento osservatore, riferisce anche della possibilità d'insorgenza di rifollamento, dovuta alle pressioni che localmente tendono a schiacciare le fibre in una trave composta e più in particolare tra le indentature e l'elemento inferiore; tali tensioni diventano decisive al fine di dimensionare le stesse indentature.

Leonardo era già conscio del fatto che per un elemento strutturale compresso lungo il suo asse, potesse verificarsi la presenza d'instabilità (Benvenuto E., 1985), anche Musschenbroeck aveva intuito che una colonna di legno sotto un carico assiale può inflettersi "...è visibile ad esempio in tutti gli alberi che s'inflettono prima di rompersi, si mostra a seguito di compressione..."<sup>85</sup>. Un fenomeno che ha interessato Ber-

nouille e che qualche anno più tardi sarà definitivamente chiarito da Eulero attraverso la determinazione del carico critico di una trave elastica e quindi di legno, con determinate caratteristiche dimensionali.

## 1.7 Resistenza e comportamento a rottura

Il fulcro della speculazione scientifica galileiana, in fatto di resistenza dei solidi, è rappresentato dal problema di resistenza di una trave infissa nel muro e di stabilità di un pilastro soggetto ad una forza orizzontale, congetture che porteranno lo scienziato pisano ad interessarsi anche nello studio di solidi di uguale resistenza, ovvero della possibilità di sagomare, in particolare una trave, in modo che possa raggiungere in ogni suo punto l'identica tensione. Problemi che affascineranno non poco i trattasti del '700, sia nella determinazione delle dimensioni resistenti di una trave di legno, sia nella descrizione del comportamento di un elemento strutturale prima del raggiungimento del collasso<sup>86</sup>.

Le deduzioni, intorno alla "forza" del legno fatte ad esempio da Musschenbroeck, Du Hamel e De Buffon vengono supportate da tabelle con evidenziate diverse caratteristiche dimensionali dell'elemento ligneo esaminato e carichi di rottura relativi, senza generalmente riferire di leggi matematiche, per altri, come in Girard e Parent, le proporzioni e in generale alcune formulazioni algebriche, sono lo strumento per interpretare la resistenza del legno.

Gli scienziati del XVIII° secolo sono ormai sicuri, basandosi sulle enunciazioni proposte da Galilei, che la resistenza di una trave di legno, soggetta quindi a flessione, è inversamente proporzionale alla sua lunghezza e direttamente proporzionale alle dimensioni trasversali, un concetto evidenziato da Parent in una memoria dell'Accademia Reale del 1707<sup>87</sup> da cui deduce direttamente, per un tronco cilindrico, la sezione rettangolare afferente, dopo la squadratura, che offre massima resistenza<sup>88</sup>.

84. Girard P.S., 1798, *Traité analytique*, (op. cit.)

85. Van Musschenbroeck P., 1745, *Institutiones*, Venetiis (op. cit.)

86. Interessanti sono le strumentazioni utilizzate per le prove a rottura, Musschenbroeck basandosi sulla tradizione Leonardiana, concepisce diverse "macchine divulsorie", realizzate a Leida dal fratello Jan. Tra le tante apparecchiature per le prove su elementi di legno, singolare risulta essere una macchina, con ogni probabilità la prima di questo genere, per eseguire prove con membrature di legno disposte in verticale (pilastri): le aste sono caricate mediante una tavola scorrevole su quattro colonnine, sulle quali vengono disposti i carichi costituiti da piombo a forma quadrata. Un epistolario inteso mostra una collaborazione tecnico-scientifica con Poleni; le macchine divulsorie di Musschenbroeck vengono, infatti, utilizzate da Poleni sia per testare le catene metalliche per il consolidamento della cupola di San Pietro, sia a scopo didattico per la formazione degli ingegneri della Scuola Padovana. Per un elenco dettagliato delle macchine ideate dai fratelli Musschenbroeck si veda l'appendice di Musschenbroeck P., 1739, *Essai de physique*, Leyden. Girard effettua le sue sperimentazioni nel porto di Havre con grandi apparecchiature, capaci di produrre una pressione di più di 100000 Kg, anche il matematico francese è interessato a prove che riguardano i solidi disposti in verticale.

87. Histoire de l'Academie Royale des sciences annee MDCCVII, Paris 1710.

88. Anche Bullet, qualche anno prima rispetto Parent, riferisce di un metodo di squadratura da un tronco cilindrico per ottimizzare la sezione resistente.

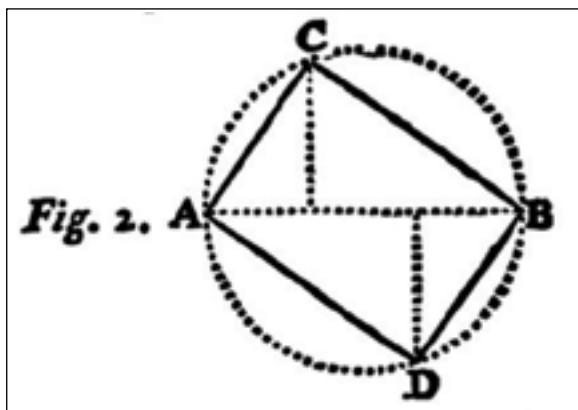


Fig. 8 La figura indica il procedimento per ottenere da un tronco d'albero, per una trave inflessa, l'area con la massima resistenza. Bullet così, precedendo Parent, che riprenderà i suoi studi, divide il diametro in tre parti uguali e da questi punti tende le perpendicolari fino ad intercettare la circonferenza del tronco; unendo i punti trovati si ottiene un rettangolo dove il lato AD risulta doppio del lato AC giungendo al massimo valore possibile del prodotto  $AC \cdot AD^2$  (da Bullet P., 1768, *Architecture pratique*, Libraires Associés, Paris);

Altro concetto ormai acquisito, anticipato peraltro da Alberti<sup>89</sup>, è che in una membratura appoggiata ai due estremi il raggiungimento del collasso, generalmente, avviene in mezzeria.

Girard differenzia, come molti altri autori, la resistenza del legno di abete da quella di quercia e propone una formula matematica basata su una proporzionalità diretta tra la "forza" del legno ed il quadrato del diametro della sezione: dato il carico e le caratteristiche meccaniche della specie legnosa, è possibile risalire alle dimensioni resistenti minime, nell'equazione oltre a figurare un coefficiente che tiene conto del peso specifico

del legno<sup>90</sup>, è presente anche un fattore riduttivo "v" legato alle condizioni ambientali in cui la membratura opera<sup>91</sup>.

Parent differenzia i vari schemi statici con cui effettua esperimenti su legno di abete e quercia, riconoscendo nel caso di vincolo maggiormente rigido rispetto all'appoggio, vicino all'incastro, un aumento del carico di rottura e quindi una diminuzione delle tensioni; anche Grandi interviene sull'argomento ribadendo la posizione del matematico francese "...un prisma o un cilindro posto sopra due sostegni...ha molto minore resistenza ché nei suoi termini fosse fitto in due muri..."<sup>92</sup>. Milizia riprendendo deduzioni fatte da De Buffon raccomanda di conficcare in maniera adeguata le travi nel muro, questa accortezza comporta un aumento di resistenza dell'elemento strutturale tale che "...se fosse invincibilmente trattenuto per le sue estremità, incastrandosi in una materia inflessibile e perfettamente dura, vi verrebbe una forza quasi invincibile per romperlo..."<sup>93</sup> Per Girard il problema è ormai chiarito "...la resistenza a flessione diventa doppia quando il solido è incastrato alle sue estremità..."<sup>94</sup>

Un'analisi della reologia di una trave di legno sottoposta a flessione viene descritta da De Buffon e Girard: all'atto del caricamento l'elemento presenta una freccia per poi successivamente collassare e mostrare, precorrendo le attuali conoscenze sulla meccanica del legno, nella zona tesa, una rottura con sfilacciatura delle fibre, la membratura, infatti, "...dopo aver scricchiolato..."<sup>95</sup> e mostrato piccole esplosioni che minacciano una rottura imminente, collassa "...accompagnata da grandi schegge..."<sup>96</sup>.

89. In una trave "...Se tu hai per forte a bucarne alcuna o a farne intaccature non lo forare mai nel mezo..." Alberti L.B., 1565, *L'architettura*, Venetia (op. cit.)

90. Data "l'elasticità"  $E_{kk}$ , variabile in relazione alla specie legnosa, per un cilindro la formula per ottenere l'altezza resistente minima è la seguente:  $h = \sqrt[3]{(200 E_{kk} / bb d)}$ , dove "b" è il diametro e "d" è il peso specifico. Girard dopo numerose sperimentazioni annota in una serie di tabelle i valori di  $E_{kk}$ , dipendenti dalla specie legnosa; inoltre al fine di considerare lo scadimento di resistenza dovuto ad eventuali difetti del legno, ovvero di un modello di calcolo non del tutto identico al comportamento reale dell'elemento strutturale, introduce un coefficiente riduttivo della "elasticità" denominato "m".

Un'altra formula per il dimensionamento di una trave inflessa viene fornita da Bullet questa volta con l'utilizzo delle proporzioni: date le dimensioni geometriche, basandosi sulle enunciazioni di Belidor, è possibile risalire, al carico massimo sopportabile come ad esempio in una trave di altezza (b)=7 pollici; base (b) =5 pollici; lunghezza (a) =12 piedi "...je multiplie 5 par 7, pour avoir la quarrè d'une de ses extremités ou le quarrè de la superficie d'une de ses deux coupes. Le produit est 35, qu'il faut multiplier par l'hauteur verticale de la meme extremitè, ou par le plus grand cotè de la superficie de la coupe, c'est a dire, 7. Le produit sera 245. Je divise ce dernier produit 245 par 12, qui est le nombre de pieds que le piece a dans sa longueur; le quotient est 20 5/12. Je fais la Regle de trois suivante: 1 : 900 :: 20 5/12 : x = 18375 livres. Dix-huit mille trois cents soixant-quinze livres, sera le fardeau que le piece pourra supporter dans son milieu l'instant avant que de se rompre..." Bullet P., 1768, *Architecture pratique*, Libraires Associés, Paris.

91. Determinanti, sia relativamente alla resistenza che alla deformazione del legno sotto carico, sono le caratteristiche dell'ambiente. L'umidità e la temperatura infatti, influenzano in maniera più o meno consistente, in dipendenza del tipo di sollecitazione, la resistenza; ma soprattutto l'umidità e in particolare il gradiente di umidità dell'elemento strutturale, caratterizzano significativamente il cedimento viscoso (CFR Hoffmeyer P., 1990). Si veda anche "Curva di Madison" una relazione che pone in rapporto la durata del carico con i valori di resistenza e di umidità di una membratura inflessa.

92. Grandi G., 1739, *Istituzioni meccaniche*, Firenze, in Di Pasquale S., 1996, *l'arte del costruire*, Venezia (op.cit.)

93. Milizia F., 1785, *Principi di Architettura*, Bassano (op. cit.)

94. Girard P.S., 1798, *Traité* (op.cit.)

95. De Buffon L. Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op.cit.)

96. Girard P.S., 1798, *Traité* (op.cit.)

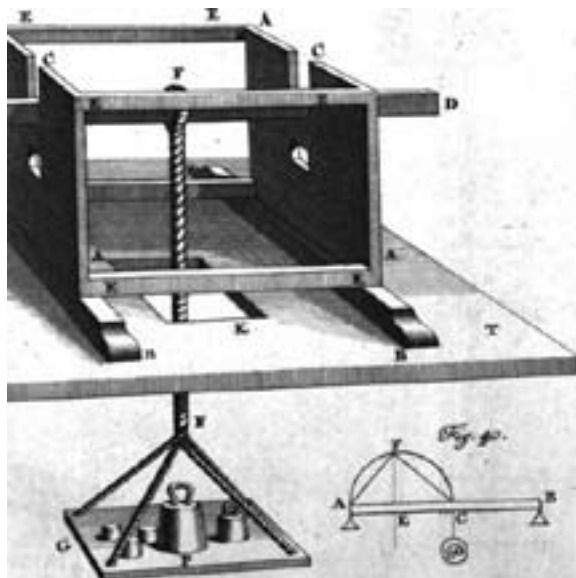


Fig. 9 Dispositivo per prove di rottura a flessione (da Van Musschenbroek P., 1729, *Physicae experimentalis et geometricae*, Samuel Luchtmans, Lugduni Batavorum).

Anche Du Hamel annota un simile fenomeno, conseguentemente alla rottura che avviene nel mezzo, "...le fibre si sono strappate per filamenti..."<sup>97</sup>.

Sul comportamento a flessione scrive anche Milizia<sup>98</sup> intuendo il corretto funzionamento di una trave caricata perpendicolarmente in mezzzeria, il collasso avviene prima nella zona compressa con corrugamento delle fibre e successivamente nella zona tesa con dislocazioni delle parti. Un concetto ampiamente compreso precedentemente da Leupold, con una chiara indicazione della plasticizzazione delle fibre nel bordo compresso prima del raggiungimento della rottura in zona tesa.

Le proprietà visco-elastiche del legno sono analizzate da De Buffon, esaminando una trave nel momento dell'applicazione del carico: il botanico francese osserva un'inflessione, senza alcuna rottura, che aumenta, a carico costante, nel tempo.

Girard, più tardi, puntualizzerà tale fenomeno evidenziando dai suoi esperimenti che una

membratura di legno netta, quindi con limitati difetti, restituisce completamente, nell'istante in cui è scaricata, la deformazione acquisita sotto carico. Comprendendo pienamente il comportamento eminentemente elastico<sup>99</sup> del legno, deduce così, il corretto legame costitutivo per un elemento strutturale di legno soggetto a flessione, caratterizzato da una proporzionalità diretta tra carico e deformazione. Inoltre Girard intuisce, riferendosi a travi di legno nelle normali condizioni d'uso ovvero che "...non hanno un'elasticità perfetta..."<sup>100</sup>, la presenza di deformazione plastica: nell'istante in cui la membratura viene scaricata, nella trave permane una freccia residua<sup>101</sup>.

L'interesse nel '700 è quindi principalmente rivolto alla trave inflessa, caso più frequentemente riscontrabile nella pratica, sia relativamente alla quantificazione della freccia, che nelle modalità di rottura; alcuni autori, tuttavia, allargano il loro campo d'indagine approfondendo anche il comportamento di una membratura di legno soggetta a sollecitazione assiale.

Musschenbroeck effettua numerose prove a rottura per comprendere il comportamento di elementi strutturali di legno sollecitati a trazione lungo l'asse; i dati, carichi e dimensioni della sezione resistente derivanti, per legni appartenenti a diverse specie, vengono pubblicati sotto forma di tabelle. Nel caso specifico la rottura dell'asta, evidenziata in una serie di disegni, avviene con bordi regolari e piani paralleli, a causa di presenza di difetti oppure lungo piani inclinati per legno sano; i campioni rotti da Musschenbroeck<sup>102</sup> presentano, in quest'ultimo caso, separazione delle fibre e conseguente dislocazione delle due parti lungo piani con diverse inclinazioni. Il trattatista inoltre, riferisce, in generale per tutte le prove eseguite a trazione, una contrazione della sezione trasversale prima del collasso.

Girard analizza elementi di legno disposti in verticale, più nello specifico indaga sul comportamento a rottura di un'asta presso-inflessa, sia con variazione dei carichi e delle caratteristiche dimensionali, che con l'utilizzo di elementi che presentano difetti come nodi e fibratura deviata,

97. Du Hamel, 1780, *Du transport*, Paris (op.cit.)

98. "... le fibre compresse agiscono nelle distese: possono essere compresse sino ad un certo segno, ma oltre compresse si romperanno..." Milizia, 1785, *Principi*, Bassano (op. cit.).

99. A maggiore precisione il comportamento è definito come elasto-fragile: superate le caratteristiche di resistenza della trave, l'elemento strutturale collassa senza mostrare evidenti deformazioni di tipo plastico.

100. Girard P.S., 1798, *Traité* (op. cit.).

101. La risposta anelastica dovuta a fatica di una trave inflessa dipende fortemente dall'entità e dalla durata del carico, oltre che dalle condizioni ambientali. Infatti risultano essere reversibili, al cessare dell'azione, solo le deformazioni accumulate derivanti da carichi permanenti e comunque per valori sufficientemente lontani da quelli che causano il collasso.

102. Van Musschenbroeck P., 1729, *Physicae eperimentales et geometricae*, Lugduni Batavorum, in particolare le Tabelle XXI e XXII

evidenziando correttamente la diminuzione di resistenza in legni affetti da tali irregolarità; in particolare il matematico francese riferisce che nell'eventualità di fibre inclinate rispetto all'asse del fusto, la rottura di una trave può avvenire con lesioni orizzontali e distacco tra le fibre, comprendendo chiaramente l'insorgenza delle tensioni tangenziali. In generale, per membrature prive di difetti, Girard descrive per la rottura le stesse modalità riscontrate nel caso della flessione semplice, cioè con sfilacciatura delle fibre. Anche in questo caso a Girard appare evidente che l'inflessione che accompagna la sollecitazione di compressione presenta un comportamento di tipo viscoso.

L'ingegnere di "ponts et chaussées" è consapevole che la temperatura e l'umidità dell'ambiente influenzano le caratteristiche di deformazione a flessione di una trave di legno.

Alcuni trattatisti evidenziano un problema di resistenza, indipendentemente dal tipo e dalla direzione della sollecitazione, causato dalla discontinuità degli strati annuali, tagliati tramite la squadratura per ottenere da un tronco una sezione rettangolare; un inconveniente, quello delle fibre tranciate, descritto da De Buffon e ripreso pedissequamente da Milizia "...una trave squadrata è composta d'un cilindro continuo di buon legno e solido, e di 4 porzioni angolari da un legno non solido e più giovane..."<sup>103</sup>; anche Girard, prima di effettuare prove a rottura sul legno, riporta simili considerazioni.

103 De Buffon L. Le Clerc, 1749, *Histoire*, Paris (op.cit.), Milizia utilizza le identiche parole

## BIBLIOGRAFIA:

- Vitruvio M. P., *De Architectura*, I sec. d.c., edizione Studio Tesi, Pordenone 1990.
- Alberti L. B., 1565, *L'architettura* di Leon Battista Alberti tradotta in lingua fiorentina, appresso Francesco Franceschi, Venetia.
- Galilei G., 1638, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*.
- Malpighi M., 1687, *Opera Omnia*, Lugduni Batavorum.
- Parent A., 1700, *Élément de mécanique et de physique*, Florentin & Pierre Delaulne, Paris.
- Parent A., 1705, *Recherches de mathématique et de physique*, Jean De Nully et Claude Jombert, Paris.
- Bernoulli J., 1705, *Vritable hypothese de la résistance des solides, avec la démonstration de la courbure des corps qui son resort, lettre du 12 Mars 1705*, *Histoire de l'Académie Royale des sciences*, in Jacobi Bernoulli, Basileensis, Opera, Tomus II, Cramer e Fratrum Philibert, Geneva, 1744.
- Parent A., 1710, *Experiences pour connoître la résistance des bois de chêne et de sapin*, in *Histoire de l'Académie Royale des sciences Année MDCCVII*, Paris.
- Leupold J., 1726, *Teatrum pontificale*, Leipzig.
- Van Musschenbroek P., 1729, *Physicae experimentalis et geometricae*, Samuel Luchtmans, Lugduni Batavorum.

- Van Musschenbroek P., 1739, *Essai de physique*, Samuel Luchtmans, Leyden.
- Van Musschenbroek P., 1745, *Institutiones Physicae conscriptae in usus academicos*, Venetiis.
- Du Hamel Du Monceau H.L., 1758, *La physique des arbres; où il est traité de l'anatomie des plantes et de l'économie végétale*, Guerin e Delatour, Paris.
- Du Hamel Du Monceau H.L., 1760, *Des semis et plantations des arbres, et de leur culture*, Guerin et Delatour, Paris.
- Du Hamel Du Monceau H.L., 1764, *De l'exploitation des bois*, Guerin et Delatour, Paris.
- Bullet P., 1768, *Architecture pratique*, Libraires Associés, Paris.
- Arduino G., 1770, *Memorie due del chiariss. Sig. Giovanni Arduino Soprantendente alla Rurale Economia pel magistrato gravissimo de beni inculti, ...sopra il modo di migliorare di conservare il legno di quercia, e di renderlo più duro e resistente...* in "Giornale d'Italia" n. XII, 15 Settembre 1770.
- Du Hamel Henry louis, 1770, *Experiences pour connoître la force des bois*, in *Histoire de l'Académie Royale des sciences Année MDCCCLXVIII. Avec les Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année*, Paris.
- Du Hamel Du Monceau H.L., 1780, *Du transport, de la conservation et de la force des bois*, Leroy Libraire, Paris.
- Diderot D., D'Alambert J. B., 1782, *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Lausanne et Berna.
- Milizia F., 1785, *Principi di Architettura civile*, Basano.
- Vivenzio G., 1788, *Istoria de tremuoti avvenuti nella provincia della Calabria ulteriore e nella città di Messina nell'anno 1783*, Stamperia Regale, Napoli.
- Masi G., 1788, *Teoria e pratica di Architettura civile*, Roma.
- Girard P. S., 1798, *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance*, Du Pont, Paris.
- Barlow P., 1826, *An Essay on the Strength and the Stress of Timber*, Architectural library, London.
- De Buffon George Louis Le Clerc, 1832, *Histoire naturelle, in Oeuvres complètes De Buffon*, di Duthilleul H.R., Douai.
- De Sallustj G., 1846, *Storia delle origini e de progressi delle matematiche*, Roma.
- Navier L.M.H., 1864, *Résumé des leçons données a l'école des chaussées sur l'application de la mécanique*, Dunod Editeur, Paris.
- Timoshenko S.P., 1953, *History of Strength of Materials*, Mc Graw-Hill Companies, New York.
- Arrigoni O., 1973, *Elementi di biologia vegetale*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- Benvenuto E., 1981, *La scienza delle costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Firenze.
- Barucci C., 1990, *La casa antisismica. Prototipi e brevetti*, Gangemi editore, Reggio C..
- Tampone G., 1996, *Il restauro delle strutture di legno*, Hoepli, Milano.
- Di Pasquale S., 1996, *L'arte del costruire tra conoscenza e scienza*, Marsilio editori, Venezia.
- Ruggieri N., 2005, *La casa antisismica*, in Atti (a cura di G. Tampone) del convegno "Conservation of Historic wooden structures", Collegio Ingegneri della Toscana, Firenze.
- Piazza M., Tomasi R., Modena R., 2009, *Strutture in legno*, Hoepli, Milano.

Nicola RUGGIERI, nato a Cosenza nel 1972, architetto, è Esercitatore di Riabilitazione Strutturale nella Facoltà d'Ingegneria dell'Università della Calabria. E' autore di pubblicazioni sul Restauro e la Storia delle tecniche costruttive.