

**Las estructuras de madera  
en los Tratados de Arquitectura  
(1500–1810)**

Las estructuras de madera en los Tratados de Arquitectura  
(1500–1810)

Depósito Legal:  
ISBN:

Imprime Artes Gráficas Palermo, S.L.  
Avda. de la Técnica, 7. Pol. Ind. Santa Ana. 28529 Rivas, (Madrid).

Autora: Isabel Gómez Sánchez  
Arquitecto

ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN TÉCNICA DE INDUSTRIAS DE LA MADERA Y CORCHO

© Isabel Gómez Sánchez  
© Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera y Corcho.  
2006

Maqueta: L. Sánchez–Seco

---

**Las estructuras de madera  
en los Tratados de Arquitectura  
(1500–1810)**

Isabel Gómez Sánchez  
*Arquitecto*



Colección Arquitectura  
AITIM

# Sumario

<b>Prólogo</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Propuesta de trabajo</b>	<b>5</b>
1.1.1. Justificación del tema propuesto	6
<b>1.2. Descripción del trabajo</b>	<b>7</b>
1.2.1. Ámbito de estudio	7
1.2.1.a. Aspectos a tratar	7
1.2.1.b. Límites temporales	8
1.2.1.c. Ámbito geográfico	9
1.2.2. Metodología	9
1.2.2.a. Fuentes de información	9
1.2.2.b. Tratamiento de la información: descripción del trabajo	10
1.2.2.c. Obtención de resultados: objetivos iniciales	11
<b>1.3. Trabajos y estudios relacionados con el tema</b>	<b>11</b>
1.3.1. Temas afines al del presente estudio	11
1.3.1.a. Estudios históricos	11
1.3.1.b. Estudios recientes	12
1.3.2. Estudios sobre carpintería de armar en España	13
1.3.2.a. Estudios recientes	14
<b>1.4. Análisis de textos</b>	<b>17</b>
1.4.1. Clasificación y ámbito de estudio	17
1.4.2. Carácter y contenidos de los tratados	19
1.4.2.a. El proyecto en los textos	19
1.4.2.b. La carpintería en construcción y su presencia en los tratados	20
1.4.3. Textos a considerar	20
1.4.3.a. Tratados anteriores al siglo XVI	20
1.4.3.b. El siglo XVI	20
1.4.3.c. Tratados del siglo XVII	25
1.4.3.d. El siglo XVIII	29
1.4.3.e. La transición al siglo XIX	34
1.4.3.f. Las teorías y experiencias científicas	36
<b>PRIMERA PARTE</b>	
<b>La carpintería en los tratados.</b>	
<b>Reglas de construcción práctica</b>	
<b>Los primeros textos</b>	<b>41</b>
<b>1. Tratados anteriores al siglo XVI</b>	<b>43</b>
<b>2. Tratados del siglo XVI</b>	<b>44</b>
<b>2.1. Italia</b>	<b>45</b>
<b>2.1.1. Vitruvio</b>	<b>45</b>
2.1.1.a. Indicaciones sobre el material	45
2.1.1.b. Estructuras de madera: cubiertas	45

2.1.2. Alberti	46
2.1.2.a. Consideraciones sobre el material	48
2.1.2.b. Puentes	49
2.1.2.c. Cubiertas	50
2.1.3. Serlio	51
2.1.3.a. Forjados	51
2.1.3.b. Cubiertas	51
2.1.3.c. Puentes	53
2.1.4. Vignola	55
2.1.4.a. Armaduras de cubierta	56
2.1.5. Palladio	57
2.1.5.a. El material	58
2.1.5.b. Cubiertas	58
2.1.5.c. Puentes	58
<b>2.2. Tratados españoles</b>	<b>61</b>
2.2.1. Juanelo Turriano	61
2.2.1.a. Puentes: clasificación	61
2.2.1.b. Otros contenidos: medios auxiliares y consideraciones sobre el material	64
<b>2.3. Francia</b>	<b>65</b>
2.3.1. Philibert De L'Orme	65
2.3.1.a. La solución constructiva de De L'Orme	65
2.3.1.b. Cubiertas	65
2.3.1.c. Forjados de gran luz	68
<b>3. Tratados del siglo XVII</b>	<b>73</b>
<b>3.1. Tratados españoles</b>	<b>74</b>
3.1.1. Tratados de carpintería "española"	74
3.1.1.a. Reglas de trazado de armaduras	74
3.1.1.b. Reglas de dimensionado de armaduras	76
3.1.2. <i>El Arte y uso de Arquitectura</i> de Fray Lorenzo de San Nicolás	78
3.1.2.a. La carpintería en el tratado	78
3.1.2.b. Cubiertas: reglas de trazado	80
3.1.2.c. Clasificación de armaduras	81
3.1.2.d. Proceso constructivo	84
3.1.2.e. Sistemas y materiales de cubierta	86
3.1.3. <i>El Compendio de Arquitectura</i> de Simón García	87
<b>3.2. Tratados franceses</b>	<b>88</b>
3.2.1. El tratado de Le Muet	88
3.2.1.a. Forjados	89
3.2.1.b. Entramados verticales	89
3.2.1.c. Armaduras de cubierta	90
3.2.2. <i>L'Architecture françoise</i> de Savot	96
3.2.2.a. Contenidos sobre madera	96
3.2.2.b. Cubiertas	97
3.2.3. El tratado de Mathurin Jousse	100
3.2.3.a. Las armaduras de cubierta en el tratado	101
3.2.3.b. Tipología estructural	102

3.2.3.c. Proceso constructivo y reglas de trazado	103
3.2.3.d. Otras estructuras: puentes, cimbras y refuerzos de vigas	106
<b>3.2.4. François Blondel</b>	<b>108</b>
<b>3.2.5. Augustin-Charles D’Aviler</b>	<b>108</b>
3.2.5.a. Armaduras de cubierta	109
3.2.5.b. Clasificación de armaduras	111
3.2.5.c. Regla de trazado para armaduras quebrantadas	111
<b>3.2.6. Pierre Bullet</b>	<b>112</b>
3.2.6.a. Armaduras de cubierta: tipos	113
3.2.6.b. Reglas de trazado de armaduras	114
3.2.6.c. Consideraciones constructivas y propuesta de dimensionado	116
3.2.6.d. Vigas y forjados	117
3.2.6.e. Entramados y tabiques	118
<b>3.3. Tratados italianos</b>	<b>118</b>
<b>3.3.1. Scamozzi</b>	<b>118</b>
3.3.1.a. Puentes de madera	118
<b>3.4. Gran Bretaña</b>	<b>120</b>
<b>3.4.1. Henry Wotton</b>	<b>120</b>
3.4.1.a. El autor y su obra	120
3.4.1.b. Contenidos sobre madera	121
<b>3.4.2. Íñigo Jones</b>	<b>122</b>
3.4.2.a. La introducción de la celosía en Inglaterra	123
<b>3.4.3. Christopher Wren</b>	<b>123</b>
3.4.3.a. Soluciones estructurales en madera	124
<b>3.4.4. Los <i>Mechanick Exercises</i> de Joseph Moxon</b>	<b>125</b>
<b>3.5. Alemania</b>	<b>129</b>
<b>3.5.1. Johann Wilhelm</b>	<b>129</b>
3.5.1.a. Armaduras de cubierta	130
<b>4. Tratados del siglo XVIII</b>	<b>135</b>
<b>4.1. Tratados españoles</b>	<b>137</b>
<b>4.1.1. García Berruguilla</b>	<b>137</b>
4.1.1.a. Armaduras de cubierta: clasificación y tipos descritos	137
4.1.1.b. Reglas de trazado y dimensionado	138
<b>4.1.2. La influencia francesa en los tratados: el padre Rieger</b>	<b>140</b>
4.1.2.a. Armaduras de cubierta: clasificación y reglas de trazado	141
<b>4.1.3. El cálculo en madera en la España del XVIII: Benito Bails</b>	<b>142</b>
4.1.3.a. El tratado de Bails	144
4.1.3.b. Cálculo “científico”: reglas de dimensionado	145
4.1.3.c. De los entramados de madera	147
4.1.3.d. De los suelos	148
4.1.3.e. Armaduras de cubierta	149
<b>4.2. Tratados franceses</b>	<b>151</b>
<b>4.2.1. Gautier</b>	<b>151</b>
4.2.1.a. Contenidos sobre madera	151
4.2.1.b. Soluciones constructivas	152

<b>4.2.2. Jombert</b>	154	
4.2.2.a. Vigas, forjados y entramados verticales		155
4.2.2.b. Armaduras de cubierta		157
4.2.2.c. Tablas de dimensionado “estricto”		160
<b>4.2.3. Belidor</b>	162	
4.2.3.a. Armaduras de cubierta		162
4.2.3.b. Contenidos técnicos		164
<b>4.2.4. Mesange</b>	164	
<b>4.2.5. Fourneau</b>	166	
4.2.5.a. Armaduras de cubierta		167
4.2.5.b. Vigas y forjados		169
<b>4.2.6. Patte y J. F. Blondel</b>	170	
4.2.6.a. <i>Instructions pour un jeune architecte</i>		171
4.2.6.b. La continuación del <i>Cours d'Architecture</i> de Blondel		173
<b>4.2.7. Camus de Mézières</b>	174	
4.2.7.a. Forjados y vigas		175
4.2.7.b. Armaduras de cubierta		177
<b>4.2.8. Obras enciclopédicas</b>	178	
4.2.8.a. Duhamel du Monceau		178
4.2.8.b. La <i>Encyclopédie</i>		180

---

### **4.3. Gran Bretaña** **184**

<b>4.3.1. James Smith</b>	184	
<b>4.3.2. Francis Price</b>	186	
4.3.2.a. Contenidos técnicos		186
4.3.2.b. Armaduras de cubierta		187
4.3.2.c. Otras estructuras		190
4.3.2.d. Indicaciones sobre dimensionado		190
<b>4.3.3. John Muller</b>	191	
4.3.3.a. La madera en el tratado		192
4.3.3.b. Dimensionado de elementos		193
4.3.3.c. Entramados verticales		194
4.3.3.d. Suelos y techos		195
4.3.3.e. Armaduras de cubierta	195	
<b>4.3.4. William Pain</b>	199	
4.3.4.a. Armaduras de cubierta		201
4.3.4.b. Forjados, vigas compuestas y vigas armadas		202
<b>4.3.5. El tratado de Peter Nicholson</b>	204	
4.3.5.a. Forjados y entramados verticales		204
4.3.5.b. Armaduras de cubierta		205
4.3.5.c. Contenidos técnicos		206

---

### **4.4. Italia** **209**

<b>4.4.1. Francesco Milizia</b>	209
---------------------------------	-----

---

## **5. Tratados del siglo XIX** **215**

---

### **5.1. La transición al siglo XIX en Francia** **215**

<b>5.1.1. Krafft</b>	215	
5.1.1.a. Indicaciones sobre el comportamiento resistente de la madera		216
5.1.1.b. Armaduras de cubierta		217
5.1.1.c. Entramados		220

5.1.2. Rondelet	222
5.1.2.a. Tabiques y entramados verticales	223
5.1.2.b. Forjados y vigas	224
5.1.2.c. Armaduras de cubierta	228
5.1.2.d. Soluciones constructivas y reglas de trazado de armaduras de faldones rectos	229
5.1.2.e. Ejemplos de armaduras construidas	231
5.1.2.f. Cubiertas curvas	233
5.1.3. Durand	234
5.1.3.a. El material	236
5.1.3.b. Entramados verticales	236
5.1.3.c. Armaduras de cubierta	236
5.1.3.d. Forjados y vigas	238
<b>5.2. Armand –Rose Émy</b>	<b>238</b>
5.2.1. <i>El Traité de l'Art de la Charpenterie</i>	239
5.2.1.a. Consideraciones sobre resistencia de la madera	240
5.2.1.b. Entramados verticales	240
5.2.1.c. Forjados	241
5.2.1.d. Armaduras de cubierta: reglas de trazado y dimensionado	242
5.2.1.e. Armaduras singulares	244
5.2.2. <i>Description d'un nouveau système d'arcs pour les grandes charpentes</i>	246

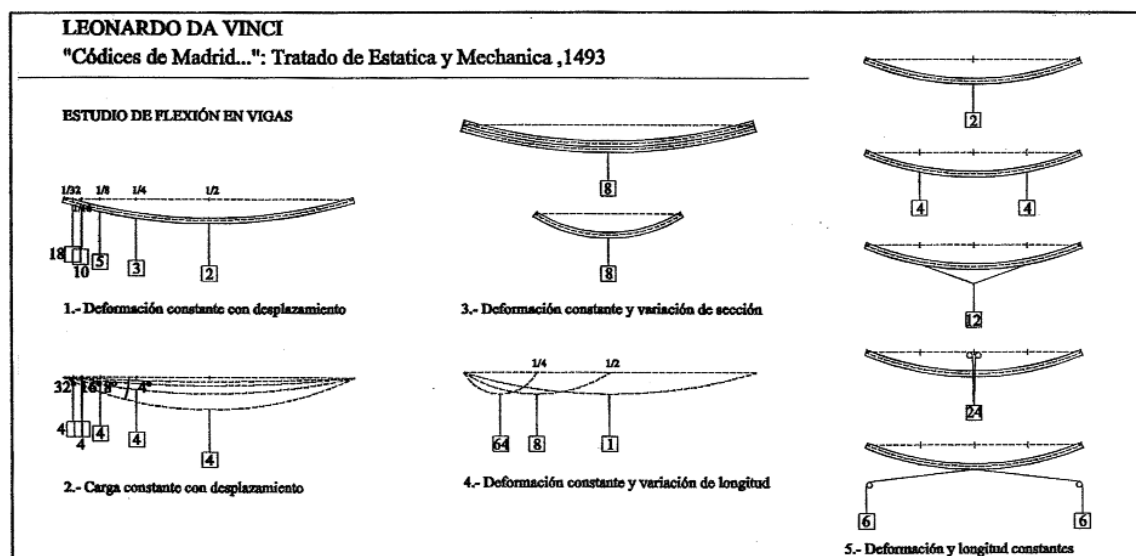
SEGUNDA PARTE:  
Teorías científicas  
y estudios experimentales

<b>6. Historia del cálculo científico en madera</b>	<b>255</b>
<b>6.1. Los orígenes del cálculo de estructuras</b>	<b>256</b>
6.1.1. Jordano Nemorario	256
6.1.1.a. Teoremas de flexión de vigas:	257
6.1.2. Leonardo da Vinci	257
6.1.2.a. Flexión de vigas	258
6.1.2.b. Columnas	259
6.1.2.c. Ensayos	259
<b>6.2. El cálculo de estructuras en el siglo XVII</b>	<b>260</b>
6.2.1. Bernardino Baldi	261
6.2.2. Galileo Galilei	261
6.2.3. Robert Hooke	262
6.2.4. Mariotte	263
6.2.5. Leibniz	264
<b>6.3. El cálculo en el siglo XVIII</b>	<b>264</b>
6.3.1. Varignon	265
6.3.2. Jaime Bernoulli	266
6.3.3. Parent	267
6.3.3.a. Ensayos y experiencias	268
6.3.4. Musschenbroek	270
6.3.4.a. Estudios experimentales	271
6.3.5. Belidor	272
6.3.5.a. Teoría de flexión	272
6.3.5.b. Experiencias	273



6.3.6. Couplet	274
6.3.7. Buffon	277
6.3.7.a. Experiencias con piezas pequeñas	279
6.3.7.b. Experiencias con piezas grandes	280
6.3.8. Duhamel du Monceau	282
6.3.8.a. El ensayo de pretensado de Duhamel	283
6.3.8.b. Otras experiencias	283
6.3.9. Emerson	284
6.3.10. Coulomb	284
6.3.11. John Muller	285
6.3.11.a. Resistencia de la madera: estudios experimentales	285
6.3.11.b. Contenidos teóricos	286
6.3.12. El <i>Traité de la force des bois</i> de Camus de Mézières	290
6.3.12.a. Objeto y carácter del tratado	290
6.3.12.b. Contenidos técnicos	292
6.3.12.c. Teoría de flexión de vigas	293
6.3.12.d. Ensayos de resistencia de la madera	295
6.3.12.e. Indicaciones prácticas de proyecto	296
6.3.13. Girard	299
6.3.13.a. Historia de la mecánica: teorías de flexión	299
6.3.13.b. Historia de la “elasticidad”: pandeo de columnas	300
6.3.13.c. Historia del análisis experimental	300
6.3.13.d. Fundamentos teóricos	301
6.3.13.e. Ensayos y experiencias	302
<b>6.4. Estado de la cuestión a principios del siglo XIX</b>	<b>303</b>
6.4.1. Hassenfratz	303
6.4.1.a. Contenidos técnicos	304
6.4.1.b. Consideraciones sobre resistencia de la madera	305
6.4.2. Rondelet	307
6.4.2.a. Consideraciones sobre resistencia de la madera	307
<b>6.5. Los tratados técnicos del siglo XIX</b>	<b>310</b>
6.5.1. Principios de la carpintería “científica” del siglo XIX	311
6.5.2. Thomas Tredgold.	312
6.5.2.a. Armaduras de cubierta	313
6.5.2.b. Forjados y vigas	315
6.5.3. Newlands	315
6.5.3.a. Carpintería “teórica”	316
6.5.3.b. Carpintería “práctica”	318
<b>7. Conclusiones</b>	<b>323</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>333</b>
<b>8.1. Estudios sobre carpintería de armar</b>	<b>368</b>
<b>Resúmenes</b>	<b>372</b>





*Deseo colocar en cada uno de estos cinco arcos de igual curvatura y longitud, un peso tal que se pueda medir en todos la misma sagita...*

(fig. 6.2 nº 5)<sup>15</sup>.

Figura 6.2. Flexión en vigas.

- 4) En el caso de la ménsula cargada, Leonardo considera que la carga soportada es inversamente proporcional a la longitud del voladizo<sup>16</sup>.

#### 6.1.2.b. Columnas

Leonardo definió la existencia de una proporcionalidad inversa entre resistencia y longitud de la columna (aunque de nuevo pasa por alto el carácter cuadrático de la relación) y directa entre resistencia y sección. Según algunos autores<sup>17</sup>, en la práctica Leonardo utilizaba reglas de cálculo de columnas sin ninguna justificación aparente:

$P = d^3$  siendo  $P$  = carga actuante,  $d$  = diámetro de la columna

$P = \sqrt{A/L}$  siendo  $A$  = sección transversal,  $L$  = longitud de la columna

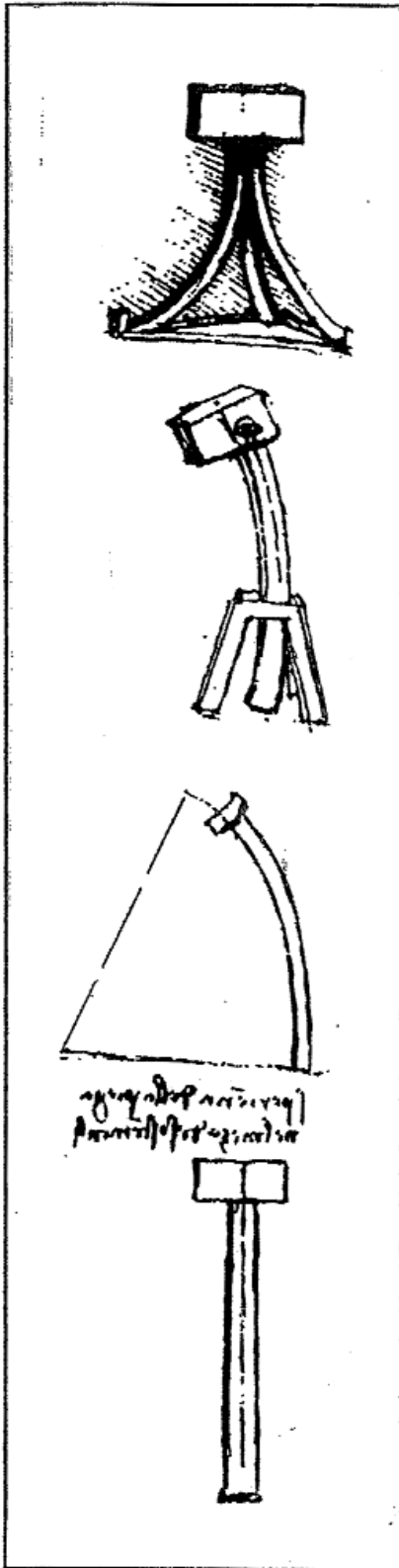
#### 6.1.2.c. Ensayos

Aparte del ensayo de cálculo de empujes en arcos de fábrica, que le permitió refutar la peligrosa y errónea creencia (asumida sin embargo por autores tan respetados e imitados como el propio Alberti) según la cual la carga de un arco de medio punto sigue la

<sup>15</sup>. Ibidem, fol. 136 verso.

<sup>16</sup>. Sobre los estudios de Leonardo, véase W. B. Parsons, *Engineers and Engineering in the Renaissance*. Cambridge: MIT Press, 1976 (1939), pp. 67-82.

<sup>17</sup>. Dorn (op. cit., pág. 21) cita a Truesdell y Parsons entre los autores que hacen referencia a estas reglas. C. A. Truesdell, *Ensayos de historia de la mecánica*, en Madrid: Tecnos, 1975 (1968).



dirección del arco, y por lo tanto no transmite empujes horizontales en su base, Leonardo describe en sus cuadernos de notas un ensayo para medir la resistencia a tracción en barras, pensado para determinar la carga de rotura de una barra de hierro. Para ello propone un curioso sistema con el que se carga una barra de 2 brazos de longitud suspendida de un soporte firme, llenando de arena una cesta que cuelga de la barra, hasta producirse su rotura. Leonardo debería haber constatado que la resistencia a tracción es independiente de la longitud de la barra, y no inversamente proporcional a ella, como admite en sus escritos<sup>18</sup>. Errores tan básicos como éste, o el no haber considerado el canto de la viga flexionada, podrían confirmar la creencia de algunos autores de que Leonardo nunca llegó realmente a ensayar ningún material ni estructura<sup>19</sup>.

En cualquier caso, su preocupación por el estudio de la estabilidad de las estructuras y la descripción de algunos ensayos de resistencia de materiales, le convierten en el padre de la formulación de los problemas de la mecánica aplicada. Sin embargo, Leonardo fue un pionero en su época, muy alejado de las prácticas tradicionales imperantes en su entorno y no logró influir en ellas (de hecho, sus investigaciones no se publicaron hasta más de dos siglos después de su muerte).

## 6.2. El cálculo de estructuras en el siglo XVII

Tras las primeras aproximaciones de Leonardo a los problemas de la mecánica (que por otro lado fueron desconocidas en su tiempo), sólo a partir de Galileo podemos decir que comenzaron a plantearse con carácter científico las investigaciones en este área de estudio.

El análisis de la flexión de vigas, y en menor medida la compresión de piezas y el comportamiento global de las estructuras, son los temas principales de estudio de los científicos de esta época en el campo de la mecánica. Desde un primer momento se proponen modelos teóricos y se realizan ensayos para comprobar su validez, que quedan recogidos en los textos técnicos y ponen de manifiesto las dificultades encontradas, especialmente en el caso de las teorías de flexión.

Figura 6.3. Dibujos de Leonardo con estudios sobre pandeo de pilares: Ms A (1492) 45v.<sup>20</sup>

<sup>18</sup>. W. B. Parsons, op. cit., pág. 73.

<sup>19</sup>. Según Truesdell, aunque Leonardo habla de experimentos en su tratado, siempre lo hace en tiempo futuro y nunca hace referencia a resultados (C.A. Truesdell, op. cit., I: *La mecánica de Leonardo da Vinci*, 3: ¿Realizaba Leonardo experimentos?,

pp. 21 y ss.). Para Parsons, sin embargo, el error es tan evidente que podría tratarse de una simple confusión del autor a la hora de redactar el principio (W. B. Parsons, op. cit., pág. 73).

<sup>20</sup>. Figura tomada de Truesdell, op. cit., pág. 30.

### 6.2.1. Bernardino Baldi

En la obra de Bernardino Baldi (1553–1617) titulada *In mechanica Aristotelis problemata exercitationes* y publicada en Mainz en 1621, encontramos la primera descripción de la forma de trabajo de una armadura de madera<sup>21</sup>. Se aprecian con bastante detalle las soluciones de encuentro del pendolón con los pares y el tirante (fig. 6.4). En éste último se puede observar la disposición de una abrazadera metálica, como corresponde a una unión a tracción, puesto que la misión del pendolón es definitiva es sujetar al tirante. Baldi describe el funcionamiento de los pares a compresión y del tirante a tracción, lo que evidencia su comprensión del comportamiento resistente del cuchillo de par y pendolón<sup>22</sup>.

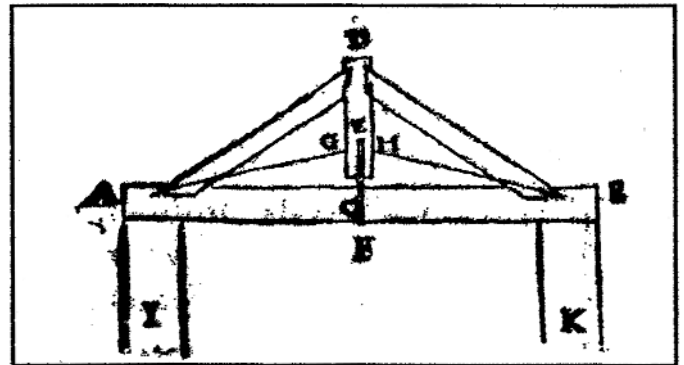
### 6.2.2. Galileo Galilei

El nacimiento de la ciencia de la resistencia de materiales se suele situar comúnmente en torno a la figura de Galileo Galilei (1564–1642). En sus *Diálogos en torno a dos nuevas ciencias* (Leyden, 1638), encontramos el primer libro conocido en el que se incluyen estudios sobre el comportamiento resistente de las estructuras. Galileo es considerado el padre del método científico, basado en la experimentación, y fue el primer investigador cuyas teorías se aplicaron en la práctica, cambiando algunos de los métodos tradicionales de construcción. Por otro lado, es también para muchos autores el fundador de la teoría de resistencia de materiales, al analizar (no tan sólo plantear, como ya había hecho Leonardo) el problema de la flexión.

Estableció la relación matemática entre tensiones normal y de cortadura (las que él denomina resistencias absoluta y relativa respectivamente), aunque quizá su aportación más destacable sea la constatación de la influencia de la esbeltez en la resistencia de las estructuras.

En el caso de la flexión de vigas, Galileo planteó tanto el cálculo de las tensiones como el análisis de las deformaciones, utilizando como ejemplo de estudio la pieza en voladizo.

**Figura 6.4.** Esquema de análisis de la armadura de par y pendolón de Bernardino Baldi: es quizá el primer documento impreso conocido (1621) en el que se estudia el comportamiento resistente de una armadura.



<sup>21</sup>. En el tratado de Henry Wotton, *The Elements of Architecture* (Londres, 1624), éste presenta a Bernardino Baldi como el primer autor que describió matemáticamente el comportamiento estructural de una cubierta de madera: “Trataron por esto muchos esta materia (la cubier-

ta), pero ninguno mas doctamente, que Bernardino Baldo, Abad de Guastala, el qual fundamental, y Mathematicamente demostrò las mas firmes ligaduras de las Vigas superiores, que constituyen el Techo.” (Wotton, 1624: Primera parte, pág. 79).

<sup>22</sup>. Se habían construido con anterioridad estructuras aparentemente de pares, tirante y pendolón. Sin embargo, en muchos casos éste último elemento no trabajaba en realidad como tal, sino como pieza de descarga de los pares sobre el tirante, solucionando su encuentro con él como una sencilla unión a compresión.

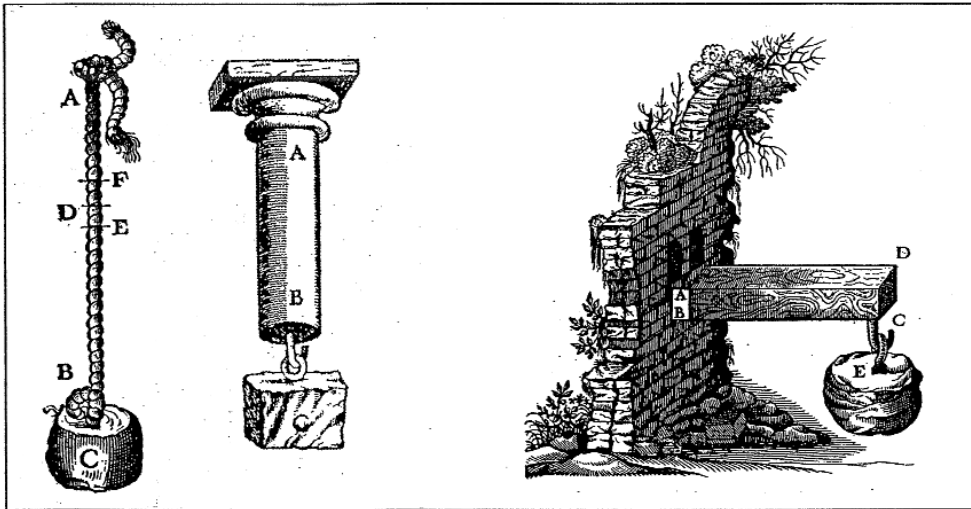


Figura 6.5. Dibujos de ensayos de resistencia de Galileo.

Por primera vez intenta encontrar una teoría que permita determinar la resistencia a flexión, aunque cometió un importante error de partida al suponer una distribución uniforme de tensiones en todos los puntos de la sección transversal y situar la fibra neutra en la cara inferior de la viga<sup>23</sup>. Galileo considera la pieza rígida y supone que la rotura se produce simultáneamente en todas las fibras de la sección del empotramiento, que gira en torno a su base (B en la fig. 6.5 dcha.), lo que equivale a aceptar que toda la sección trabaja traccionada, obteniéndose un módulo resistente de valor  $1/2 \cdot bd^2$ .

Galileo también es autor de las primeras descripciones de ensayos de estimación de resistencias. Aplicables al caso de la madera, encontramos (además del mencionado de flexión de vigas) un ensayo de tracción de una pieza cilíndrica, con el que calcula lo que él denomina “resistencia absoluta a la rotura” (tensión última en la dirección de las fibras), llegando acertadamente a la conclusión de que su valor es directamente proporcional a la sección de la pieza e independiente de la longitud, aunque no aporta valores de las cargas de rotura obtenidas.

### 6.2.3. Robert Hooke

Robert Hooke (1635–1703) publicó en 1678 sus *Lectures de potentia restitutiva, or of Springs...* una obra en la que declara la existencia de una proporcionalidad directa entre carga y variación de longitud (que lo es en realidad entre tensión y deformación, pero resulta válida al comparar cargas y deformaciones manteniendo constante la sección); en todo caso, con este principio Hooke sienta las bases de la teoría de la elasticidad. Al analizar la deformación de la viga flexionada, señala también muy acertadamente que en sus fibras existen tanto acortamientos como alargamientos.

Pero aunque relaciona en todo momento las deformaciones con las fuerzas actuantes y acepta la relación lineal, no plantea todavía el equilibrio de momentos de dichas fuerzas.

Por otro lado, a Hooke le debemos también las primeras experiencias de estimación de resistencia de la madera de que se tiene noticia. Fueron realizadas bajo el patrocinio de la *Royal Society*, en 1664: se trata de ensayos de flexión de vigas de pequeño tamaño, con los que se pretendía calcular la resistencia de distintas especies. Se cargaron hasta la rotura piezas de entre 0,25 pulgadas de diámetro y 4 de escuadría, con longitudes que iban desde tan sólo 1'5 pulgadas hasta 4 pies, en roble, fresno y pino.

<sup>23</sup>. Resulta sorprendente la equivocación, que contradice principios no sólo evidentes sino además fácilmente constatables mediante sencillos ensayos, que Galileo con toda seguridad no realizó.

Dimensiones de las piezas		Carga de rotura (libras)		
Escuadría (pulgadas)	Longitud (pies)	Pino	Roble	Fresno
1 x 1	2	200	250	325
1/2 x 1/2	1	—	—	—
1/2 x 1	1	—	—	—
1/2 x 1 1/2	1	—	—	—

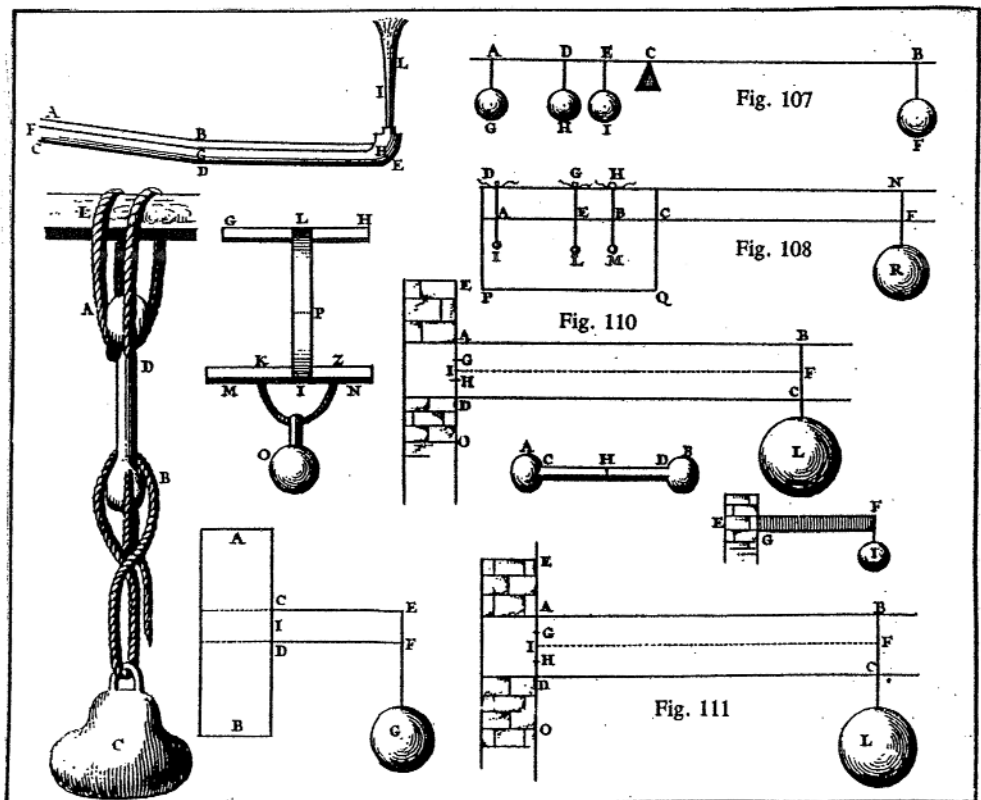
**Tabla 6.1.** Tabla de ensayos de vigas de Hooke (las cargas indicadas corresponden al informe de 23 de marzo de 1664; las dimensiones de la parte inferior, a las condiciones de otros ensayos).

### 6.2.4. Mariotte

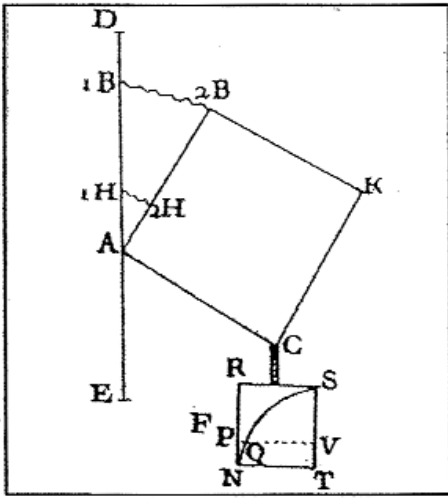
Edme Mariotte (1620–1684), representa un paso adelante en el desarrollo de la teoría de flexión de vigas, al corregir el modelo de distribución uniforme de tensiones de Galileo en favor del triangular.

En su *Traité du Mouvement des Eaux et des autres corps fluides*, publicado en 1686 después de su muerte, fruto de sus ensayos con piezas de madera, llegó a la conclusión de que la teoría de Galileo, válida para materiales completamente rígidos, difícilmente puede aplicarse a los reales, y mucho menos en el caso de la madera. En la viga flexionada las fibras se acortan o alargan en función del esfuerzo a que están sometidas (como ya había indicado Hooke), y no sólo hay tracciones, como supuso Galileo, sino también compresiones.

**Figura 6.6.** Lámina de Mariotte, con figuras de ensayos de flexión de vigas y análisis de resultados<sup>24</sup>.



<sup>24</sup> E. Mariotte, *Oeuvres complètes sur les sciences...*, La Haye: Jean Neaulme, 1740.



**Figura 6.7.** Modelo de Leibniz del comportamiento de las fibras en la sección transversal de la viga flexionada utilizado para el cálculo del momento flector.

En un principio, y tras constatar en sus ensayos la existencia de una relación lineal entre carga y variación de longitud, propuso para la viga en voladizo un modelo en el que suponía una distribución triangular de tensiones en la sección transversal; pero de nuevo situó equivocadamente la fibra neutra en la cara inferior de la pieza (con lo que se obtiene un módulo resistente  $1/3 bd^2$ ). Posteriormente pasó a considerar la existencia de compresiones en la parte inferior de la viga, lo que supone localizar la fibra neutra en el interior de la sección, pero no supo determinar exactamente su posición. Asumió un comportamiento elástico lineal e igual en tracción y compresión, calculando erróneamente en  $1/3 bd^2$  el valor del módulo resistente (que en tal supuesto es  $1/6 bd^2$ ). En cualquier caso, y pese a errores de cálculo, con Mariotte quedan definidos los principios básicos del análisis de flexión de vigas.

Para verificar su teoría, realizó ensayos de tracción y flexión de piezas de madera, con los que sin embargo no obtuvo los resultados esperados. Aparte de los errores del modelo teórico adoptado, parte de las diferencias pudieron deberse a que fueron realizados con vigas cilíndricas extrapolando equivocadamente los resultados al caso de la sección rectangular. O a haber trabajado con piezas de reducido tamaño (de tan sólo  $1/4$  de pulgada de diámetro y 4 de longitud), a las que afectan notablemente las propiedades físicas del material. El hecho es que pese a que no servían para apoyar su teoría, Mariotte continuó defendiéndola, justificando las diferencias en el efecto del tiempo de aplicación de la carga. También fruto de sus experimentos llegó a determinar, en este caso con más acierto, que la resistencia (carga última) de la viga con los extremos fijos es el doble de la biapoyada, aunque no supo encontrar una explicación teórica a este dato.

### 6.2.5. Leibniz

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) coincide con Mariotte, de nuevo en contra de la teoría de Galileo, en la hipótesis de la deformabilidad. En sus *Demonstrationes novae de resistentia solidorum* (*Acta Eruditorum* de 1684), sitúa la fibra neutra en la cara inferior de la viga en voladizo y supone una distribución lineal de tensiones en las fibras de la sección.

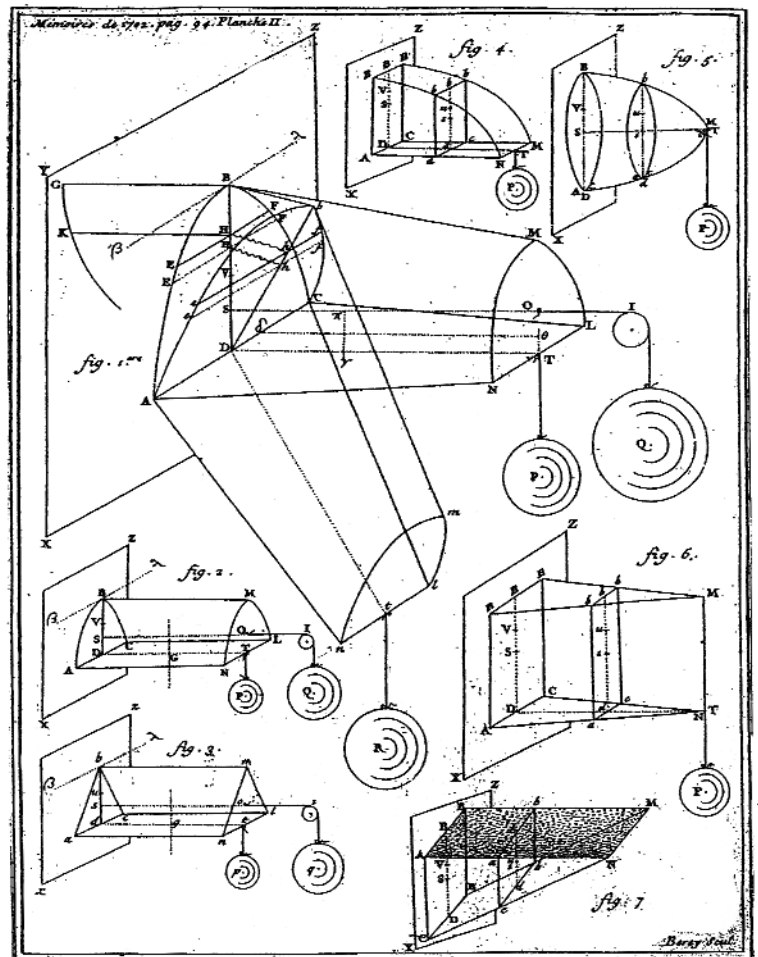
Su modelo propone imaginar cada fibra de la viga unida al empotramiento mediante un pequeño muelle, cuya elongación es proporcional a su distancia y al punto de giro,  $A$ . Acepta igualmente que la elongación es proporcional a la “tensión” o fuerza actuante sobre cada fibra. De donde se obtiene que la tensión en una fibra a distancia  $y$  de  $A$  es función de  $y$  ( $\sigma = \sigma_{\max} \cdot y/h$ ), y su momento lo es de  $y^2$ .

De este modo, la suma de fuerzas se identifica con el valor del módulo resistente, y la de momentos con el del momento de inercia de la sección.

### 6.3. El cálculo en el siglo XVIII

Como venimos observando hasta el momento (Galileo, Mariotte, Leibniz), en el estudio de la flexión de vigas no hubo acuerdo entre los científicos del XVII sobre el modelo teórico a adoptar. Pero tampoco se alcanzó en el XVIII, sucediéndose las teorías que analizaban la distribución de tensiones en la sección de la pieza y la situación de la fibra neutra.

**Figura 6.8.** Lámina de Varignon con estudios de flexión en piezas en voladizo.



### 6.3.1. Varignon

Pierre Varignon (1654–1722) representa un nuevo paso hacia la formulación de la ley del paralelogramo de fuerzas, al enunciar el principio de superposición de momentos, según el cual el momento estático de la resultante de dos fuerzas es igual a la suma de los momentos de cada una de ellas.

En el caso del problema de la flexión de vigas, cuestiona tanto el modelo rectangular de tensiones de Galileo como el triangular de Mariotte y Leibniz, en 1702<sup>25</sup>. Coincide en suponer la fibra neutra en la base de la viga, pero pone en duda que entre tensiones y deformaciones tenga que existir una relación lineal. Propone una teoría según la cual la tensión en cada punto es una función de su distancia a la fibra neutra del tipo  $\sigma = k^m$  (para  $m = 0$  obtenemos la solución de Galileo, de tensión constante; para  $m = 1$  la tensión lineal de Mariotte). Integrando entre ambos valores se obtiene el propuesto por Varignon para el cálculo del momento resistente.

Varignon compara la carga última a tracción  $Q$  con la de flexión  $P$ , en voladizos de distinta sección, sin tener en cuenta el peso propio, y según los modelos de Galileo y Mariotte. Para ello plantea el equilibrio estático de momentos de dichas fuerzas respecto al punto  $D$  (fig. 6.8):

- Según la hipótesis de Galileo:  
 $P = Q \cdot DS / DT$  (siendo  $S$  el centro de gravedad de la sección);
- Según la de Mariotte:  
 $P = Q \cdot DS \cdot DV / DT \cdot DB$   
 (donde  $V$  es el centro de gravedad del triángulo de tensiones de la sección).

<sup>25</sup> P. Varignon, "De la résistance des solides en général pour tout ce qu'on peut faire d'hypothèses touchant la force ou la ténacité des Fibres des Corps à rompre; Et en particulier pour les hypothèses de Galilée & de M. Mariotte". *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, 1702, pp. 66-94.