

LA CIÈNCIA A L'ENGINYERIA:

EL LLEGAT DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Discurs d'ingrés de l'acadèmic:

Xavier Oliver i Olivella

Dr. Enginyer de Camins, Canals i Ports

Barcelona 2006

INDEX DE CONTINGUTS

I. - MOTIVACIÓ.....	7
II. - LA INSTITUCIÓ.....	11
ELS ORIGENS	12
UNS NOUS ALUMNES.....	14
UN NOU ENSENYAMENT	19
..... I UNS NOUS LLIBRES DE TEXT	23
L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE I EL PODER POLÍTIC: LA REFORMA NAPOLEÓNICA.....	24
III. - ALGUNS NOMS.....	31
LAGRANGE (1736-1813).....	31
FOURIER (1768-1830).....	33
CAUCHY (1789-1857).....	35
NAVIER (1785-1836).....	37
POISSON (1781-1840).....	39
ARAGO (1786-1853).....	40
SAINT- VENANT (1797-1886).....	42
SOPHIE GERMAIN (1776-1831).....	43
IV. -UN EXEMPLE PARADIGMÀTIC: LA ENGINYERIA ESTRUCTURAL	47
ANTECEDENTS HISTÒRICS	47
GALILEO GALILEI.....	50
ROBERT HOOKE.....	55
EDME MARIOTTE.....	60
JACOB BERNOULLI.....	64
ANTOINE PARENT.....	67
LEONARD EULER.....	68
.....i un nou (vell) vingut:.....	71
LEONARDO DA VINCI.....	71
CHARLES AGUSTIN COULOMB.....	73
RESUM DE SITUACIÓ.....	75
L'ANÀLISI ESTRUCTURAL I L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE	78

POISSON.....	78
NAVIER.....	80
PONCELET.....	82
CAUCHY.....	83
LAMÉ.....	84
SAINT-VENANT.....	85
V. -CLOENDA.....	93
ANNEX 1:.....	99
DEMOSTRACIO DE LA LLEI DE LA PALANCA (EQUILIBRI DE MOMENTS) EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO.....	99
ANNEX 2:.....	104
SOBRE LA RESISTENCIA DE PEÇES SOTMESES A TRACCIÓ EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO.....	104
ANNEX 3:.....	106
SOBRE LA RESISTENCIA DE PEÇES SPTMESES A FLEXIO I RESISTENCIA DE MENSULES EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO.....	106

INDEX D'ILUSTRACIONS

FIGURES

Figura 1: Gravats sobre el setge de Siracusa.....	8
Figura 2: L'École Polytechnique de Paris.....	14
Figura 3: L'École Polytechnique a començaments del segle XIX.....	19
Figura 4: Gravats del Collège de Navarre, antiga entrada de l'École Polytechnique enderrocada al 1811, rue de la Montagne Sainte-Genève.....	26
Figura 5: Portada de l'obra <i>Description de l'Égypte</i>	29
Figura 5: Pedra de la Rosetta.....	34
Figura 6: Piràmide de Saqqara (Egipte).....	47
Figura 7: Aqueducte de Segovia.....	48
Figura 8: Interior del Panteó de Roma, pintat per Giovanni Paolo Panini.....	49
Figura 9: Portada de <i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i> (Galileo, 1638).....	51
Figura 10: Estudi sobre la llei de la palanca (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i> , Galileo, 1638).....	52
Figura 11: Estudi de peces a tracció (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i> , Galileo, 1638).....	53
Figura 12: Estudi de ruptura de mènsoles (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i> , Galileo 1638).....	54
Figura 13: Carta de Robert Hooke a Robert Boyle.....	56
Figura 14: Esquema de l'estudi de propietats elàstiques a <i>De Potentia Restitutiva</i> (Robert Hooke, 1678).....	57

Figura 15: Anagrama sobre les formes anti-funiculars (<i>Description of Helioscopes</i> , Robert Hooke, 1705)	58
Figura 16: Estudi de mecanismes flexibles i de flexió de bigues a <i>De potentia restitutiva</i> (Robert Hooke, 1678)	59
Figura 17: Assaigs científics de Edme Mariotte (1681)	61
Figura 18: Estudis sobre comportament a tracció i flexió de bigues de Edme Mariotte ²⁸	62
Figura 19: Evolució de la estimació de la distribució de l'esforç flector, M , sobre una secció de peça prismàtica a flexió: a) Galileo (1638) b) Mariotte (1670) c) Parent (1713)	63
Figura 20: Arbre genealògic de la família Bernoulli (en negreta els membres més eminents de la saga)	64
Figura 21: Estudi de Jacob Bernoulli, a les Actes de l'Acadèmia de Ciències de París, sobre el comportament elàstic de bigues (1704).	66
Figura 22: Elogi de A. Parent a <i>Historia de l'Acadèmia de Ciències de París</i> , de Fontanelle (1716)	67
Figura 23: Primera pàgina del treball d'Euler del 1728 sobre corbes elàstiques.....	70
Figura 24: Reproducció del foli 84 del <i>Codi de Madrid</i> (manuscrit original de Leonardo de Vinci) sobre la teoria de bigues.....	72
Figura 25: Dispositiu experimental de Coulomb per a la realització d'estudis sobre la torsió.	74
Figura 26: Fragment d'un treball de Poisson sobre la teoria de forces moleculars en un medi elàstic	79
Figura 27: Fragment d'un treball de Navier sobre les equacions d'equilibri en un medi elàstic	81
Figura 28: Un dels primers treballs de Cauchy mostrant les equacions que porten el seu nom.	83

Figura 29: Primera pàgina d'un treball de Saint Venant sobre la Teoria de la Elasticitat en un llibre de mecànica.	86
---	----

TAULES

Taula 1: Dades del nombre de candidats i d'acceptats en les primeres proves de selecció.....	16
Taula 2 : Dades de la extracció social dels alumnes a l'any 1799 ..	17
Taula 3 : Evolució de l'origen social del politècnics.	18
Taula 4 : Contingut de matèries del primer i segon any d'estudis.	22
Taula 5: Evolució cronològica de la Mecànica Estructural abans de l'École Polytechnique: de Leonardo a Coulomb.	77
Taula 6: Evolució cronològica de l'anàlisi estructural durant els primers anys de l'École Polytechnique: de Poisson a Clapeyron	89

You see things; and
you say "Why?" But
I dream things that
never were; and I say
"Why not?" —
George Bernard
Shaw

I.- MOTIVACIÓ

Tot i la creença comú de que el terme enginyer prové *del que fa enginys*, possiblement l'afirmació s'hauria d'invertir: els enginys esdeveniren allò que construïen els enginyers. De fet, les paraules enginy i enginyer (i també enginyós) es desenvoluparen en paral·lel de l'arrel llatina *ingeniosus* que podríem traduir per hàbil⁴³. Inicialment, el terme enginyer designava, en la terminologia militar, a aquells que fabricaven, màquines de guerra o realitzaven treballs per a propòsits militars (ja al 1325, el constructor de una torre de setge era denominat amb la paraula normanda *engynour*²⁸). En aquest sentit l'història de l'enginyeria es remunta molt enllà en el temps, i foren enginyers militars personatges com Arquímedes (282 a.C.-212 a.C.) qui, com a defensor de la seva Siracusa natal davant del setge terrestre i marítim al que la sotmeteren els romans al 212 a.C., va desenvolupar un seguit d'eficients ginys de guerra que l'historiador Plutarc cita en la



Arquimedes de Siracusa

descripció de la campanya de Marcellus, el general que comandava l'exercit Romà:

... quan Arquímedes començà a desplegar el seus ginys veiérem grans catapultes enviant contra les forces de terra immenses masses de pedra que queien amb un soroll i una violència increïbles i contra les quals cap home podia fer-hi res; colpejaven a aquells sobre els que queien a dojo, trencant les seves files....mentrestant, enormes palanques sorgien de les muralles i deixaven caure grans pesos sobre els vaixells enfonsant-los; altres eren grans braços amb urpes de ferro al seu extrem amb les que agafaven als vaixells per la proa i els enfonsaven la popa fins a fer-los naufragar, o els alçaven en l'aire i els estavellaven contra grans roques sobresortint de les muralles provocant una gran destrucció en els soldats que portaven, o els mantenien hissats a gran altura tombant-los i gronxant-los, d'una manera horrible, fins a fer caure a tots els mariners



Figura 1: Gravat sobre el setge de Siracusa

Durant molt de temps van ser els militars els únics als que era aplicat el nom d'enginyer. No fou fins a mitjan del segle XVIII quan va aparèixer un nou tipus d'enginyer, relacionat amb treballs que, si bé podien coincidir amb els que executaven els clàssics enginyers militars, no tenien un propòsit exclusivament militar, ni estaven executats per soldats. Per a distingir-los del anteriors aquest enginyers van ser designats com a Enginyers Civils, encarregats del disseny i la planificació d'obres de tipus civil d'acord amb la definició de la Institució d'Enginyers Civils de Londres al 1828:

... per a controlar la força de la natura pel benefici i la conveniència de la humanitat...

Tot i que històricament no se'ls hi hagi adjudicat aquest nom, però en el mateix esperit de la definició anterior, podríem considerar doncs com a enginyeria totes aquelles activitats humanes que s'han desenvolupat al llarg de la història, encaminades a la creació de màquines, aparells, ginyes i construccions *amb una aplicació (immediata) al benefici i conveniència de la humanitat*. Enginyers serien doncs els projectistes de les calçades, vies, ponts i aqüeductes romans que permeteren la extensió i transmissió d'una cultura i tecnologia de les que som hereus, enginyers serien també els arquitectes navals dissenyadors de vaixells que propiciaren la conquesta dels oceans, com també ho serien els creadors àrabs dels sistemes hidràulics de rec i de elevació d'aigües...

Al començament del segle XIX la especialització gradual en les tasques dels enginyers, feu sorgir noves denominacions per a branques específiques de la enginyeria: la enginyeria de mines, enfocada als treballs i construccions necessaris per a la extracció dels minerals i la enginyeria mecànica, encaminada cap al disseny de màquines i mecanismes, foren les primeres. Mes endavant, el creixement del coneixement científic, i la necessitat d'aplicar-lo, conduí a una explosió de noves branques de la enginyeria: la

enginyeria elèctrica, la enginyeria química, la enginyeria naval etc.

Ja mes a prop dels nostres dies trobem noves branques i sub-branques, cada vegada mes especialitzades: la enginyeria aeronàutica, la agrícola, la enginyeria de telecomunicacions la enginyeria informàtica, la enginyeria aero-espacial, la enginyeria nuclear, la enginyeria de materials, la enginyeria bio-mecànica etc.

Possiblement ningú negaria el caràcter científic de la recerca en la enginyeria dels nostres dies ni la qualificació de la enginyeria com a *ciència, o conjunt de ciències, que genera nous coneixements, en uns àmbits que li son propis i amb una orientació específica vers la aplicació*. Possiblement ningú negaria, tampoc, que a la enginyeria de la actualitat es fa un ús intensiu de ciències mes bàsiques o fonamentals: de les matemàtiques, de la física, la química... per a investigar, en la mes estricta ortodòxia del mètode científic, noves propostes i tecnologies.

Però això no ha estat sempre així...

II. - LA INSTITUCIÓ

Si bé la història de l'enginyeria, entesa com l'art de crear i construir màquines i aparells i d'efectuar construccions, es remunta al inici de la nostra civilització, durant molts anys l'art de l'enginyeria fou essencialment això: un art, o potser millor dit, una artesanía. El seu aprenentatge seguia els mateixos esquemes i procediments que en altres tasques artesanies: el binomi mestre-aprenent n'era la base. El mestre, en general un únic mestre, instruïa a l'aprenent, o a un petit grup d'aprenents, a través d'un llarg procés, en tots els aspectes del seu art, des dels més bàsics fins a aquells més sofisticats. El nivell d'especialització dins de cada artesanía era molt petit, no es podia, ni es pretenia, aprofundir, i l'innovació era el fruit de la llei dels grans nombres: la repetició i la transmissió d'experiències anteriors i els processos de prova i error eren les úniques fonts de progrés en la tecnologia emprada. Cap, o molt pocs, dels esquemes de treball del mètode científic hi eren presents.

Així doncs, durant molts segles la presència i la incidència de la ciència a l'enginyeria fou molt escassa. Des de la alta edat mitjana la ciència es feia en altres institucions: a Europa no tant a les Universitats, a on el component religiós predominava, com a les denominades Acadèmies de Ciències o (Reials) Societats de Ciències, directa o indirectament lligades al poder civil, normalment les monarquies absolutistes o l'aristocràcia, que les recolzava política i econòmicament. En aquestes Acadèmies de Ciències, i també a algunes Universitats, grans figures científiques com Galileo (1564-1642), Newton (1643 -1727), Leibniz (1646-1716), els Bernoulli (Jacobus 1654 - 1705, Johannus 1667-1748 i Daniel 1700-1782), Euler (1707 -1783) i tants d'altres, havien fet avançar el coneixement de les matemàtiques la física i la mecànica de manera espectacular. Emperò, la incidència d'aquests nous coneixements en el benefici i la conveniència de la humanitat era encara molt reduïda. El coneixement científic provenia més d'una

raó filosòfica (la necessitat de comprendre) que d'una voluntat o necessitat d'aplicar-lo.

Així doncs, a finals del segle XVIII, hi havia Ciència a Europa ... i també hi havia Enginyeria. Però la Enginyeria seguia essent, majoritàriament, un coneixement artesà, basat en normes empíriques i regles de bon ús, sense eines abstractes que permetessin la simplificació i la generalització. Certament, a mitjan del segle XVIII començava a haver-hi centres específics per a l'ensenyament de la enginyeria, com les franceses École de Ponts et Chaussées¹⁴ (fundada al 1747) i l'École des Mines¹⁵ (al 1783), però els procediments d'ensenyament i aprenentatge de la enginyeria no eren molt diferents dels esmentats mes amunt. La Ciència i la Enginyeria eren, doncs, més apart.

Fins que un dia, tot va canviar...

ELS ORIGENS

...els savis que havien fet coses tan grans (per la revolució), gaudien d'un crèdit sens límits. No s'ignorava que la república els devia la seva salut i la seva existència. Per això s'aprofitaren d'aquest instant de favor, per assegurar-li la superioritat dels coneixements que l'havia fet triomfar dels seus enemics. Aquest fou l'origen de l'École Polytechnique. Els fets parlaven aleshores massa fort perquè es pogués posar en dubte la utilitat de les ciències i de les arts...." (paraules del físic i matemàtic Jean-Baptiste Biot¹⁶).

Corria l'any 1794, i en un París convulsionat pels dies caòtics de la Revolució Francesa, i de l'anomenat Regne del Terror, es produeix un fet que aleshores podia semblar poc significatiu: el

vint-i-ú del mes Ventós, en denominació revolucionària (l'onze de Març en la nostra denominació actual), i a instàncies, entre d'altres, del prestigiós geòmetra Monge i del químic Fourcroy, el Comitè de la Salut Pública creà una Comissió de Treballs Públics⁶, i una institució per allotjar-la: l'École Centrale des Travaux Publics, que mes tard fou anomenada École Polytechnique.

La Comissió⁷ es va instituir per raó d'un informe a la Convenció revolucionària que proposava la unió en una sola administració dels enginyers encarregats dels treballs militars de defensa i dels enginyers civils¹³. La idea jacobina d'una reorganització centralitzada del estudis de l'enginyeria civil i militar, ja havia estat proposada per alguns membres de la comissió i Monge l'acollí amb entusiasme. Tot i que la responsabilitat, i per tant el mèrit precís, de la fundació de l'École Polytechnique sembla una mica difuminada, si es ben provat que Monge fou un actor important de la primera hora de l'École Polytechnique⁷. També son clars quins eren el objectius concrets que es perseguïen¹³:

...davant de la manca de quadres científics i tècnics i de les necessitats cada vegada mes urgents de la Nació, es decideix constituir una Comissió composta pels científics i enginyers més eminents. Aquesta comissió serà la encarregada de establir un programa que permeti formar un gran nombre de científics i de tècnics, políticament segurs (¿ ?) i competents en el pla tècnic.

El govern revolucionari cridà doncs a científics i savis de renom que, encara que no eren jacobins ortodoxes, van ser encarregats de reformar el sistema de ensenyament superior francès.

⁶ Alguns historiadors l'anomenen la *Comissió dels savis*

⁷ En paraules de Louis de Lonay a la seva obra *Monge fondateur de l'École Polytechnique*, Monge fou el vivificador d'aquesta comissió i l'executor de la primera hora.



Figura 2: L'École Polytechnique de Paris

L'École Polytechnique va obrir les seves portes el dia primer del mes Nevòs (21 de Desembre) de 1794¹⁶. Així doncs, el 21 de Desembre de 1794, esdevé la data fundacional de l'École Polytechnique; però, es mes que això.....es el començament d'un nou camí, pels enginyers i la enginyeria, d'aleshores fins als nostres dies.

UNS NOUS ALUMNES....

L'espectre sociològic del primers alumnes de l'École va significar un gran canvi respecte al tradicional. D'acord amb els principis del nou règim revolucionari, per primera vegada els vells privilegis no tenien cabuda en la educació i un gran nombre d'estudiants, de totes les classes socials, acudiren a la convocatòria de un nombre reduït de places, que foren cobertes

amb criteris competitius i basats en els resultats d'exàmens específics, a través de vint-i-dos centres de reclutament distribuïts per tot el país¹⁸. Els estudiants foren reclutats sense discriminació de naixença o de fortuna i per raons només dels seus mèrits. Segons paraules del mateix Fourcroy a la Comissió¹⁹:

...volem cridar a aquells que ja son, a hores d'ara, els mes preparats, per tal de que la República pugui fruir aviat de l'exercici dels seus talents. La única manera de reconèixer-los es fer-los passar un examen que doni la mesura precisa de la intel·ligència i de la disposició de cadascun d'ells...

La crida va ser un èxit, i els millors estudiants del país van ser seleccionats.

La idea de reclutar mitjançant un examen fou aleshores una innovació atrevida: més encara si es considera que podia enfrontar-se amb els principis d'igualtat que propugnava la revolució. A més, i per a evitar possibles renunciïes, per manca de medis econòmics, es va becar als estudiants amb un sou que equivalia al d'un artiller de primera classe¹⁶.

Els criteris de selecció eren durs com es desprèn dels índexs de presentats i admesos en els primers anys de vida de l'École Polytechnique (vegeu la Taula 1), mes encara si es considera que molts dels candidats es preparaven durament a les denominades, *escoles preparatòries*, que seleccionaven, al seu torn, els estudiants que deixaven presentar-se a les proves.

Any	Nbre. Candidats	Nbre. acceptats	% Acceptats
1794	678	391	58 %
1795	143	62	57 %
1796	348	113	32 %
1797	233	108	46 %
1798	336	143	43 %
1799	437	125	29 %
1800	291	75	26 %
1801	301	110	37 %
1802	201	117	58 %
1803	293	139	47 %
1804	351	134	38 %
1806	284	174	61 %
1808	251	159	63 %

Taula 1: Dades del nombre de candidats i d'acceptats en les primeres proves de selecció (extretes de la referència¹³).

Aquest circumstancies no foren obstacle perquè alguns aspectes marcadament elitistes fossin presents en l'esperit fundacional de l'École Polytechnique. Ans al contrari, es tractava de crear un *élite* intel·lectual, curiosament seleccionada, primer, i excepcionalment formada, després, destinada a ocupar llocs preeminents en la estructura de lideratge social i intel·lectual de la societat revolucionària. La gran diferencia respecte al sistema precedent es que la extracció social no hi tenia, en principi, res a veure.

La extracció social dels alumnes de l'École, es també reveladora de que els principis de selecció no es varen subvertir en els primers anys de vida la institució. Com es pot comprovar a la Taula 2, dels alumnes del 1799 només 39, sobre 274, (un 15%) eren de famílies riques, mentre que 160 (un 58%) no tenien cap fortuna.

Défenseurs de la patrie sortant des armées de la Ré- publique	15
Fils d'artisans ou de cultivateurs.	116
Fils d'artistes, employés, hommes de loi et officiers de santé (1).	67
Fils de fonctionnaires à la nomination du peuple	14
Fils de militaires, soit retirés, soit en activité de service.	13
Fils de représentants du peuple	9
Elèves dont les parents vivent de leurs revenus	20
Fils de présumés ex-nobles	12
Sans qualification	8
	<u>274</u>
II.	
Sans fortune.	160
Présumés dans l'aisance.	75
Présumés riches	39
	<u>274</u>

Taula 2 : Dades de la extracció social dels alumnes a l'any 1799 (tret de la referència³⁶).

Aquest fou l'esperit inicial de la institució, del que n'és un paradigma l'argument donat pels membres de la Comissió fundacional¹⁸:

...els alumnes seran reclutats sense discriminació de naixença ni de fortuna sinó únicament pels seus valors i els seus mèrits...

Es, emperò, ben cert que el caràcter inter-classista dels alumnes de l'École es va anar perdent al llarg dels anys. Alguns historiadors parlen de que ja a mitjan del segle XIX els costos de la estança i manteniments dels alumnes no podien ésser sufragats més que per les classes benestants. La Taula 3 il·lustra com havien canviat les coses cent anys després de la fundació de l'École. El

temps jugava clarament en favor dels alumnes provenint de la classe de industrials i negociants, i en contra dels fills de funcionaris.

Origine sociale des polytechniciens (en %)				
Origine sociale	Promotion			
	1815-1829	1830-1847	1848-1879	1880-1914
Rentiers et propriétaires	26,5	31,1	28,5	12,1
Professions libérales	10,6	13,1	17,2	10,2
Hauts fonctionnaires et officiers supérieurs	14,9	12,2	15,6	8,3
Fonctionnaires de niveau hié- rarchique inférieur et officiers subalternes	13,6	10,1	5,2	9,0
Industriels et négociants	9,1	10,7	17,3	23,0
Petits fonctionnaires et soldats	9,1	3,6	1,2	9,0
Artisans et boutiquiers	1,6	3,4	3,2	9,5
Classes populaires	00,4	00,2	00,6	10,2
Inconnus	14,2	15,6	11,2	8,7

Ce tableau a été établi à partir du registre d'inscription de l'École polytechnique.

Taula 3 : Evolució de l'origen social del politècnics (tret de la referència³⁶).

Un aspecte curiós en els orígens de la École Polytechnique es el denominat *privilegi*^{*}, atorgant als seus alumnes l'accés exclusiu a certs cossos civils i militars, que fou molt controvertit posteriorment³⁶.

* Per llei del dia 30 del mes Veremador (Setembre) de l'any IV de la revolució.

UN NOU ENSENYAMENT

L'École Polytechnique va incorporar per primera vegada, i d'una manera sistemàtica a l'enginyeria, la especialització en l'ensenyament.



Figura 3: L'École Polytechnique a començaments del segle XIX

Es partia de la idea de que les diferents branques de l'enginyeria demanaven la mateixa o similar preparació en matèries com les matemàtiques, la física o la química. Se suposava que, si

l'estudiant rebia una bona formació en aquestes ciències fonamentals, podria després adquirir més fàcilment la formació en aspectes específics de l'enginyeria. D'acord amb aquest pla, els primers dos anys de formació a l'École es dedicaren exclusivament a l'ensenyament de ciències bàsiques. Posteriorment, al llarg del tercer any, l'estudiant es formava en aspectes concrets de l'enginyeria⁴⁰.

Ja de bon començament molts dels mes prestigiosos científics de l'època, i d'arreu d'Europa, s'oferiren com a professors per aquest nou projecte formatiu, atrets, ben segurament, pel seu caràcter innovador o per la qualitat dels alumnes que s'hi havien de trobar.

El resultat d'aquesta combinació de grans mestres i grans alumnes fou explosiu. Per primera vegada les grans disciplines científiques podien ser explicades, de manera sistemàtica i per experts, a alumnes capaços i àvids d'aplicar-les a les branques de l'enginyeria per les que sentien vocació.

La especialització de l'École en les disciplines bàsiques de la Ciència va portar a que, poc després, la formació en els aspectes mes aplicats de l'Enginyeria es deixés fora de la institució. L'École va passar a ser una escola de ciències fonamentals, pels estudiants que planejaven entrar en una de les grans escoles d'enginyeria de l'època*: L'École de Ponts et Chaussées (precursora de les actuals Escoles d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports), la Escola de Enginyers de Mines, les Acadèmies militars etc.

Tot sovint es parla del dilema ciència pura/ciència aplicada, referint-se a la orientació formativa dels primers anys de l'École Polytechnique. El dilema està focalitzat en els que foren les personalitats dominants en la primera època⁶ (del 1794 al 1825): el geòmetra Monge, com a representatiu d'una orientació de

* Les anomenades *écoles d'application*.

l'ensenyament envers la pràctica, i el matemàtic Laplace mes abocat a la formació teòrica³³. Sembla, però, que aquesta dualitat es mes aviat artificiosa i que no respon ni a unes actituds pedagògiques diferents ni a una disparitat de criteris educatius.

Ambdós son fidels a un mateix sentit de la paraula enginyer³³; un home format en les especulacions teòriques, enfocant-les cap a la tècnica i les realitzacions concretes i, també, tots dos estan d'acord en la manera de formar-lo: *utilitzar en l'ensenyament les metodologies mes generals, per tant les més teòriques, les més garantides, i per tant les mes recents, per a consolidar les possibilitats de les seves aplicacions*³³.

Fou a l'École Polytechnique a on les classes de pràctiques o de laboratori foren introduïdes per primera vegada com a part de l'ensenyament regulat⁴⁰. Les classes es dividien en petis grups, anomenats brigades, de al voltant de vint estudiants, al front dels quals s'hi posava un instructor, per a resoldre aspectes pràctics dels ensenyaments, fer experiments de laboratori o treballs de camp. Els alumnes mes brillants d'aquestes brigades eren, amb el temps, promoguts a les tasques professorals. L'École esdevenia doncs una institució per a la formació, no només de futurs enginyers, sinó també de professors i científics.

La vida dels primers estudiants a l'École Polytechnique era exigent. La disciplina era quasi militar, treballaven vuit dies i mig de cada dècada (un dècada era el període revolucionari de deu dies que substituïa a la setmana en el període revolucionari) durant onze mesos a l'any. Inicialment, el règim era d'externat i els estudiants, vinguts de tot el país, residien a les cases de famílies de provada fidelitat revolucionària.

La càrrega lectiva de la primera època, incloïa cursos de Geometria Descriptiva (impartits pel propi Monge, el primer

Director), Matemàtiques (amb matèries de geometria diferencial, equacions diferencials i càlcul variacional), Mecànica i Física (incloent mecànica de partícules, mecànica de sòlids rígids i de fluids i una mica d'astronomia), Química i Dibuix²¹ (vegeu la Taula 4).

The image shows two tables from a historical document, likely a curriculum or schedule for the first year of studies at the École Polytechnique. The tables are titled 'PREMIERE ANNEE D'ETUDES' and 'OBSERVATIONS'. They list various subjects and the time spent on each, with columns for '1799', '1800', and '1801'. The subjects listed include: Arithmétique, Algèbre, Géométrie descriptive, Mécanique, Philosophie, Chimie, Astronomie, and others. The time spent is indicated in columns labeled '1799', '1800', and '1801'. The tables are handwritten and show the progression of the curriculum over time.

Taula 4 : Contingut de matèries del primer i segon any d'estudis (tret de la referència³⁶). Les columnes "temps" indiquen el temps (en tant per cent) dedicat a la docència, i a l'estudi i treball, de cada matèria.

³³ Es parla doncs de la *Escola de Monge* i la *Escola de Laplace*

..... I UNS NOUS LLIBRES DE TEXT

Com que era la primera vegada que aquestes disciplines, eren ensenyades a grups d'alumnes nombrosos, s'imposava la aparició de llibres de text. Ben aviat es va iniciar la publicació del *Journal Polytechnique* que, si bé va començar essent un recull extens de les classes impartides per els professors, ben aviat va transformar-se en un medi de publicació dels seus treballs de recerca. També van aparèixer llibres de text específics com la *Geometria Descriptiva* i el *Curs d'anàlisi aplicada a la geometria*, escrits per Monge, *Lliçons de mecànica analítica*, escrit per Prony, *Tractat de Mecànica*, per Poisson, *Càlcul diferencial i integral*, per Lacroix, *Tractat de física*, per d'Hauy etc.

Aquest llibres, que foren llegits no solament a França sinó, ben aviat, arreu del món, exerciren una gran influència en l'avenc i en l'ensenyament de les ciències fonamentals⁴⁰. Possiblement, qualsevol enginyers d'avui dia que llegeixi aquestes ratlles, trobarà familiars, quan els compari amb els corresponents a la seva pròpia formació tot i encara dos-cents anys després, els noms de les assignatures i els títols dels llibres esmentats. Això es una prova de la enorme influència que van tenir els plans d'estudi i la metodologia d'ensenyament de l'École Polytechnique en l'esdevenir de l'ensenyament de l'enginyeria arreu.

Hi ha un aspecte singular a l'École Polytechnique original, i que fou mantingut, al menys, durant els seus primers cent anys de vida. Es refereix a la, fins aleshores, clàssica divisió en tres categories, de les institucions dedicades a les activitats intel·lectuals: la recerca científica, la formació científica i l'ensenyament d'una activitat professional. Aquesta divisió no es va donar a l'École: les tres activitats es pretenen simultàniament⁴¹. La generació del coneixement, l'aprenentatge de com fer-ho i la transmissió d'aquest coneixement són objectius des del mateix inici, com ho proven la organització i finançament de bell antuvi de laboratoris de recerca a la institució. Com a conseqüència

d'aquesta política inicial alguns historiadors estimen que, durant els primers cinquanta anys de vida de l'École, el 40% dels científics francesos provenien de l'École Polytechnique⁴⁴.

Mes endavant, a partir de la meitat del segle XIX es produeix un declivi de la producció científica a l'École i, en general, francesa, en favor d'altres institucions, com es ara l'École Normale, i d'altres d'Alemanya i de l'àmbit anglosaxó⁴⁴. Però en molts aspectes la feina ja estava feta. Els científics de l'École Polytechnique ja havien deixat un empremta indeleble i senyalat com s'havia de seguir el camí que ells havien encetat.

L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE I EL PODER POLÍTIC: LA REFORMA NAPOLEÓICA

La institució, volia ser una casa de Ciència i Educació i pretenia una total independència dels poders polítics i econòmics, definint-se com⁴¹:

*....una institució que vol ser el paladí dels drets dels
pobres contra l'abús del poder i les prerrogatives dels
rics en la distribució del beneficis de la educació ..*

Tot i això es evident que aquests principis es van subvertir ben aviat. Mes enllà dels ideals revolucionaris, els poders polítics no podien, ni volien, deixar passar la oportunitat de intentar controlar una institució destinada a ser generadora de les noves classes intel·lectuals del país. En aquest sentit el primer, i reeixit, intent no es feu esperar gaire. En arribar al poder absolut Napoleó Bonaparte, al 1804, trobà deplorable la organització governamental i de la societat en general; la centralitza, la militaritza i en reforça la burocràcia⁴⁶. El progrés democràtic s'atura i la participació de la ciutadania en la vida política es redueix. L'École Polytechnique es

veu profundament afectada per aquesta situació que marcarà la seva història durant tot el segle XIX.

Al 1804, l'Emperador escriu una carta al Comandant* de la L'École Polytechnique per fer-li saber la seva temença de que la institució esdevingui un centre d'activitats anti-governamentals³⁶ manifestant-li que:

....es perillós donar una formació avançada a gent que no surten de famílies riques. S'haurà doncs de canviar el caràcter gratuït de la escolaritat i fer que els alumnes en paguin els costos....Per evitar to risc de revolta del Politècnics, L'École ha de ser desplaçada a un lloc menys central a on la seva influència sobre les masses sigui menor...

A més, segons el pla de Napoleó, l'ensenyament deixaria de tenir el seu caràcter científic/aplicat i els alumnes de l'École ja no serien candidats naturals a posicions claus de l'administració i la gestió de l'Estat.

Alarmat Monge[†], aleshores conseller científic de l'Emperador, intervé i li fa veure els riscos d'aquesta política: la pèrdua que, per l'Estat i l'exèrcit, suposaria renunciar al potencial científic proporcionat per la innovadora estructura de la institució.

Napoleó, li fa cas ...només parcialment. Deixant ben clars que els seus objectius final era el control de la institució, decideix aleshores militaritzar l'École Polytechnique. La institució es trasllada des del seu emplaçament original, al Palais-Bourbon, al Collège de Navarre, a la muntanya de Santa Genoveva i els alumnes passen a residir-hi en règim d'internat. S'instaura l'ús de l'uniforme i de la instrucció i exercicis militars; l'esperit de la jerarquia, la

* Així s'anomenava al director de la institució als primers anys

† al barri llatí de París

‡ el principal impulsor de la fundació i de l'estructura original de l'École Polytechnique

disciplina i la severitat s'imposa en la vida diària dels estudiants. Els ajuts econòmics que permetien als estudiants de les classes populars accedir-hi son revocats i, a més, s'instauren despeses de manutenció i escolarització tan altes que només podien ser sufragades per les classes benestants.

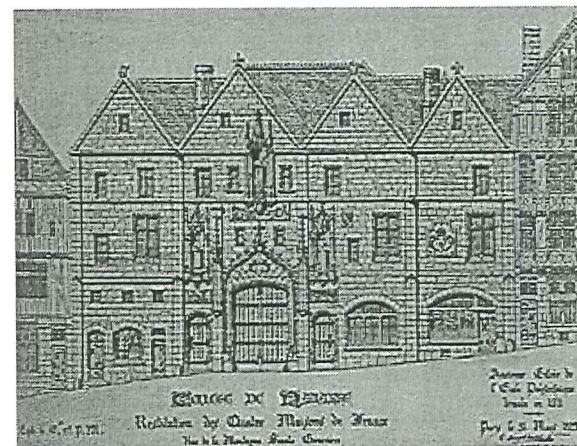


Figura 4: Gravat del Collège de Navarre, antiga entrada de l'École Polytechnique enderrocada al 1811, rue de la Montagne Sainte-Genève

D'altra banda, i sortosament, el professorat de l'École Polytechnique i els programes d'estudi no son modificats substancialment. El contingut científic/aplicat de l'ensenyament es preserva majoritàriament. Com a molt hi ha un lleu gir envers l'aplicació militar (artilleria, fortificació) d'alguns ensenyaments específics. La sortida professional dels alumnes s'orienta majoritàriament cap a l'exèrcit (Écoles militars en un 70%) en detriment de les grands écoles (École de Ponts et Chaussées i École de Mines).

Els estudiants de l'École es veieren doncs confinats a l'interior de murs físics i morals. La seva capacitat d'interacció amb la societat real del seu temps es veié sensiblement disminuïda i l'École deixà de ser un perill pel poder establert. Tot i això, i malgrat el fet de que l'extracció social dels alumnes provenia ara majoritàriament de la burgesia, no deixà de haver-hi una certa contestació, en forma de conviccions anti-bonapartistes expressades en inscripcions als murs de la vella École, contra la Església i la corrupció de la nova aristocràcia, contra la supressió de les llibertats i de la igualtat, i contra la militarització de l'Estat³⁶.

L'historiador Fourcy, a la seva obra, *Histoire de l'École Polytechnique*³⁸, dona algunes indicacions de que hi havia, entre els anys 1810-1821:

... una mena de organització oculta en la que els alumnes deliberaven entre ells, i prenen decisions que eren, per dir-ho així, obligatòries també pels que havien refusat de subscriure-les...

i exemplifica amb una anècdota el poc que es tolerava la indisciplina:

*...el dotze d'Abril de 1816 es va declarar un estat d'insubordinació oberta per part d'alguns alumnes; el tretze d'Abril tots van ser expulsats *....*

També alguns, potser molts, dels professors, es van posicionar contra les reformes i la traïció que suposaven a l'esperit fundacional de l'École Polytechnique. En particular, Monge, portaveu d'un ampli grup de científics, expressà la seva decepció: per a ell, la supressió de les ajudes econòmiques als estudiants,

* la raó de la situació es il·lustrativa d'un especial sentiment de solidaritat entre els estudiants de l'École Polytechnique: un gran nombre d'alumnes, del primer curs, havien comès una falta de disciplina per la qual, només alguns d'ells, foren castigats. La resta s'hi van oposar demanant que el càstig fos general, tal i com ho havia estat la falta.

anava contra els principis d'igualtat d'oportunitats en el procés de reclutament, limitant-lo a les capes socials més afavorides. Tem que els futurs estudiants, quan abandonin la institució, es consagrin més a la recerca de posicions privilegiades i beneficis personals que al servei desinteressat del país³⁶.

La reforma deixà profundament marcada l'École Polytechnique per la resta del segle XIX. El plantejament meritocràtic fundacional es va mantenir, però ara limitat a les classes econòmiques privilegiades que podien accedir a l'École. L'esperit Politècnic es va tornar marcadament elitista, ja no només en el sentit intel·lectual sinó, essencialment, en el social. Durant uns anys el desenvolupaments científics de l'École Polytechnique, passaren de buscar l'aplicació en l'àmbit civil i industrial, a cercar-la en l'àmbit militar.



Gaspard Monge

Nogensmenys, es cert que, anteriorment, Napoléon havia proporcionat, directa o indirectament, algunes noves possibilitats de creixement científic de l'École Polytechnique: la expedició de Bonaparte a Egipte, al 1798, s'emportà una missió científica de cent seixanta-cinc membres entre els que s'inclouien alguns rellevants professors i alumnes de l'École Polytechnique (el cèlebre Jean Baptiste Fourier n'és un exemple). Aquesta va ser la primera gran expedició científica de l'època i va aportar grans resultats a algunes branques de la ciència: es va descobrir la famosa pedra de Rosetta i la expedició va inaugurar la nova ciència de la egiptologia

quan, al seu retorn va publicar el tractat *Description de l'Égypte** (vegeu la Figura 5).

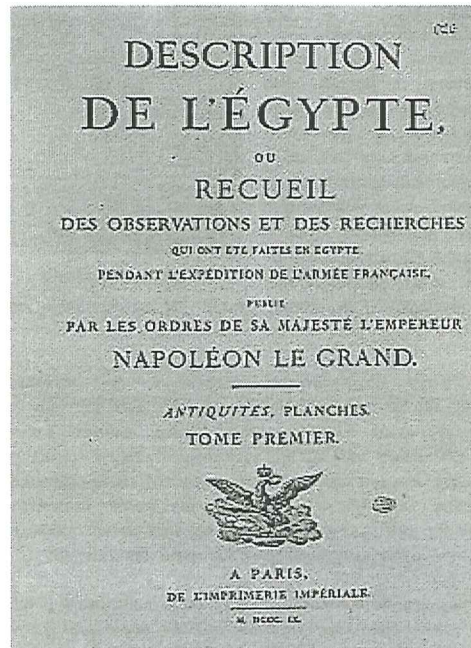


Figura 5: Portada de l'obra *Description de l'Égypte*

* Curiosament, a l'École li va costar alguns anys obtenir un exemplar de la *Description de l'Égypte* per la seva biblioteca, tot i que la major part dels col·laboradors de l'obra fossin sortits del seu si.

En qualsevol cas, i tal com manifesta l'historiador J. Shinn³⁶, durant els trenta cinc primers anys de l'École Polytechnique, França va ésser dominada per tres règims polítics diferents, i cadascun d'ells hi va deixar la seva impronta. L'ensenyament que s'hi donava i els fins pretesos no foren independents de la política i dels valors específics de les capes socials dominants.

El resultat es que, des d'aleshores, l'École Polytechnique va retrobar, d'una banda, els conceptes d'elitisme social propi de l'*Ancien Régime* pre-revolucionari, de manera que la major part dels seus alumnes provenien de famílies que tenien un estatus social i econòmic elevat. D'altra banda, i a diferència d'aquella, aquesta élite tenia els seus fonaments no ja en l'aristocràcia sinó en la burgesia, sobretot una burgesia cultivada intel·lectualment.

III. - ALGUNS NOMS

Fins aquí hem vist una breu història dels inicis de la institució, però....¿que en podem dir dels seus membres ?.

La llista de professors i alumnes, de l'École Polytechnique, que van fer contribucions cabdals al món de la Ciència, en general, i de la Enginyeria, en particular, es aclaparadora.....Només durant els primers cinquanta anys de vida de la institució tenim a *Lagrange, Cauchy, Laplace, Ampère, Navier, Poisson, Arago, Carnot, Saint-Venant, Duhamel, Lamé, Coriolis, Fourier, Biot, Clapeyron, Gay-Lussac*....per a dir-ne tan sols uns quants. Molts d'ells van ser, primer, alumnes destacats de l'École Polytechnique per esdevenir-ne, després, eminents professors. Tanmateix, és difícil escollir-ne uns quants com a representatius de tot el col·lectiu, i dels seus mèrits com a docents i científics. Només criteris tant subjectius com es la seva contribució a l'àrea del coneixement que és més familiar a l'autor, la Mecànica dels Medis Continus i la Teoria d'Estructures, o de ser representatius de especials virtuts científiques i humanes, li han permès fer-ne una selecció de noms, dels que es farà una petita ressenya.

LAGRANGE (1736-1813)

Joseph-Louis Lagrange va néixer a Torí al 1736, en el que aleshores era el regne de Sardenya. No era, doncs, francès de naixement ni tampoc es deia Lagrange, sinó *Giuseppe Lodovico Lagrangia*. Mes tard, quan va traslladar-se a París, va canviar el seu nom a la versió francesa que avui coneixem.

Va ésser el primer professor de Matemàtiques de l'École Polytechnique, a la que va arribar com un matemàtic de prestigi

procedent de l'Acadèmia de Ciències de Berlín, en la que succeí a Euler com a Director de Matemàtiques y, després, de l'Acadèmia de Ciències de París. Els fets de la revolució francesa i del Regne del Terror el van afectar significativament mitjançant una història dramàtica: davant d'un ordre d'expulsió, al 1793, de tots els residents estrangers, el seu amic, el també famós químic Lavoisier, el va avalar perquè no fos expulsat del país o, potser, empresonat o mort. Un any després, el mateix Lavoisier fou detingut, acusat de conspiració contra la revolució, i guillotinat davant la consternació del Lagrange.



Joseph Luis Lagrange

A l'Ecole Polytechnique, Lagrange, va introduir l'ensenyament de les matemàtiques de més alt nivell de l'època, com corresponia a un il·lustre coetani d'Euler, Laplace, Daniel Bernoulli, i d'Alambert amb els que mantingué freqüent contacte. Com a professor era molt teòric i una mica avorrit; segons paraules del seu alumne a l'École, el després també famós matemàtic Fourier, que diu d'ell que *explicava en veu molt baixa i amb un horrorós accent estranger pronunciant les esses com a zetes*.

Alhora, era molt reconegut pels seus col·legues³⁸ i fou autor de la famosa obra *Teoria de les funcions analítiques* que va aparèixer al 1801 a la revista de l'École, el *Journal Polytechnique*. La tasca científica de Lagrange va ser reconeguda públicament per l'emperador Napoleó Bonaparte que el va nomenar *Compte de l'Imperi* al 1808. Va morir cinc anys més tard al 1813.

FOURIER (1768-1830)

Tothom que alguna vegada hagi estudiat matemàtiques, transmissió de calor o acústica s'haurà topat amb el geni de Jean-Baptiste Joseph Fourier. La seva infantesa no fou fàcil. Era fill d'un sastre d'Auxerre que morí un any després de que també ho fes la seva mare, quan Fourier tenia nou anys.



Jean Baptiste Fourier

Educats pels benedictins, es preparà per la carrera eclesiàstica, però ben aviat aquesta vocació va entrar en conflicte amb la seva natural predisposició i capacitat extraordinària per la Ciència, i va abandonar els estudis religiosos. Un tercer element de conflicte va sorgir quan es veié involucrat en la revolució, com a membre del comitè local revolucionari d'Auxerre, al 1793. Tal i com ho va escriure:

...quan les idees de la igualtat natural es van desfermar, va tornar-se possible concebre la sublim esperança d'establir entre nosaltres un govern lliure, exempt de reis i clergues, per a alliberar d'aquest doble jou al, durant tant de temps usurpat, sòl d'Europa...jo vaig esdevenir un enamorat de la causa; en la meua opinió la més gran i bonica que cap nació a emprès.

Així doncs, Fourier va esdevenir un revolucionari, però altres revolucionaris el van empresonar quan va sortir en defensa de les víctimes del Regne del Terror. Va estar molt a punt d'acabar a la guillotina, de la que el va salvar només el canvi de règim després de l'ajusticiament de Robespierre.

Va ingressar a l'École Polytechnique amb la primera promoció d'estudiants, i en fou l'alumne més excepcional. Als vint-i-set anys, tan sols, va ocupar plaça de professor a l'École, però les raons polítiques el perseguiren i fou empresonat de nou. Finalment, els seus col·legues i amics aconseguiren alliberar-lo i enviar-lo a l'estranger, acompanyant a un prometedor general, encara més jove que ell, Napoleó Bonaparte, en la companyia de d'Egipte on hi va participar com a membre destacat de la missió científica que, entre altres coses, trobà la famosa pedra de la Rosetta (vegeu la Figura 6).

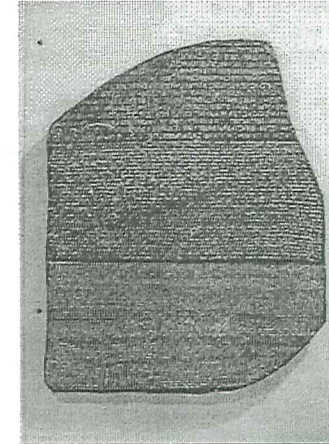


Figura 6: Pedra de la Rosetta

De retorn a França, va tornar a les seves classes d'Anàlisi Matemàtica i de Mecànica a l'École Polytechnique però, ben aviat, fou reclamat per a Napoleó, ara amb tot el poder a França, per exercir el càrrec de prefecte del departament d'Isère. Curiosament Fourier, que durant el seu professorat a l'École Polytechnique s'havia guanyat una gran anomenada com a excel·lent

docent, però sense realitzar un treball científic significatiu, ara, exercint un càrrec polític, va començar la seva gran tasca científica.

Escriu el treball anomenat *Teoria analítica de la calor* que tracta sobre la transmissió de la calor en sòlids; la realitat és aquest treball significà molt més del que el seu títol indicava; va encetar el camp de l'anàlisi lineal a la matemàtica moderna. Com sol ocórrer amb moltes obres mestres, el treball trencà conceptes anteriors i va ofendre a altres grans matemàtics que no l'acceptaren. Van haver de passar quinze anys fins que el fou publicat, al 1922, ara transformat en un gran tractat de matemàtica i física aplicada ... el més important del seu temps.

Els treballs de Fourier van alterar radicalment la manera de entendre i de ensenyar l'enginyeria a les generacions d'enginyers que el van seguir. Com a conseqüència de la seva estada a Egipte, Fourier va ser co-autor també del llibre *Description de l'Égypte*, que fou el més ampli estudi d'egiptologia fet fins el moment.

CAUCHY (1789-1857)

¿Qui davant de un text de Anàlisi Matemàtica o d'un tractat de Elasticitat o de Mecànica de Medis Continus, no s'ha trobat el nom de Cauchy, una i altra vegada encapçalant postulats, teoremes o formulacions ?.

Agustin-Louis Cauchy, va néixer a París al 1789. Durant la seva infantesa, i fugint de la revolució, el seu pare es refugià a Arcueil, un poble prop de París a on s'hi refugiaven també alguns dels millors científics del país, com Lagrange, Laplace i Berthollet, que es reunien a casa de Laplace. Cauchy, va tenir la oportunitat de tractar-los, i, estimulat per aquesta experiència, va créixer amb un

intel·lecte inquiet. Al 1805 passà l'examen de entrada de l'École Polytechnique, examinat pel famós físic Jean-Batiste Biot i va ser admès en el lloc número dos.



Agustin Cauchy

Ja de bon començament va demostrar una extraordinària competència i capacitat en matemàtiques. Quan va acabar la seva formació al Polytechnique va entrar a la École de Ponts et Chaussées a on va ser també un extraordinari estudiant.

En acabar els seus estudis, al 1810, va començar a treballar com a enginyer del port de Cherbourg i en el projecte del canal de Ourcq, a les ordres del seu principal projectista l'enginyer Pierre Girard. Per circumstàncies polítiques les obres del canal es van interrompre, i això va donar més temps a Cauchy per a dedicar-se plenament a la seva recerca matemàtica. Curiosament, les seves sol·licituds per a ser admès com a professor, en diverses institucions de l'època, van ser continuament rebutjades fins que, al 1815, fou contractat a l'École Polytechnique com a professor d'anàlisi matemàtica. A partir d'aquest moment la fama dels seus treballs es va estendre ràpidament, i va ser admès a l'acadèmia de Ciències de París. A les seves classes a la Sorbona hi assistien no tan sols els seus alumnes, sinó investigadors i professors d'arreu, estimulats per la originalitat i rigor del seus ensenyaments.

Una vegada a l'École Polytechnique, va entrar en contacte amb els treballs de Navier sobre la Teoria de la Elasticitat. Els va trobar tant estimulants que s'hi va dedicar amb passió. El resultat van ser unes enormes contribucions al desenvolupament i formalització de la teoria matemàtica de la elasticitat. A ell li devem, entre moltes altres aportacions, les anomenades equacions

de Cauchy, equacions diferencials que expressen l'equilibri a l'interior d'un medi continu, la formalització a partir dels anomenats postulats de Cauchy del concepte de tensió que donà lloc al que avui coneixem com a tensor de tensions de Cauchy, la formalització del concepte de deformació..... Les seves contribucions en aquest camp van ser, i encara son, d'una immensa vàlud⁴⁰.

Malgrat el seu geni científic, Cauchy, de caràcter difícil i molt introvertit, va ser un home de relacions personals difícils i no gaire benvolgut pels seus col·legues. Continues disputes sobre l'autoria de diversos desenvolupaments el van enfrontar amb alguns d'ells, com es ara Duhamel. Durant la seva vida va produir set cents vuitanta nou treballs científics que van ser compilats en les seves obres completes⁸ en vint-i-cinc volums... i uns nombres extraordinaris !.

NAVIER (1785-1836)

Claude-Louis-Marie-Henri Navier nasqué a Dijon al 1785. El seu oncle, Emiland Gauthey, era un dels mes prestigiosos enginyers civils del país i li va transmetre la seva vocació per la Enginyeria.

Tot i que va ingressar a l'École Polytechnique en un posició no gaire destacada, ben aviat començà a obtenir altes qualificacions, i va acabar estant entre els deu primers de la seva promoció. Durant la seva estança a l'École va tenir con a professor a



Claude Navier

Fourier, que va romandre com el seu amic i conseller per la resta de la seva vida. Tot seguit, va ingressar a l'École de Ponts et Chaussées on es va graduar, com a enginyer civil, al 1808.

Navier es el típic exponent de l'enginyer-científic, interessat tant en les vessants teòriques de la seva ciència com en la seva aplicació a problemes pràctics. De fet, a més de un gran científic, va ser un gran dissenyador i constructor de ponts, amb moltes aportacions tècniques, especialment en la tipologia de ponts penjats. El seu llibre *Memòria sobre els ponts penjats* va ser el manual de referència pel disseny d'aquest tipus de ponts fins molts anys després de la seva mort.

Al 1819 va entrar com a professor de Resistència de Materials a l'École de Ponts et Chaussées, on va canviar dràsticament el perfil empíric amb que s'impartia fins aleshores aquesta disciplina, per un ensenyament mes basat en fonaments físics i matemàtics. Al 1831 va substituir a Cauchy com a professor de càlcul i matemàtiques a l'École Polytechnique.

Navier es molt conegut per les seves aportacions a diferents camps de la Ciència. Sense anar mes lluny per les famoses equacions, dites de Navier-Stokes, que descriuen el moviment dels fluids viscosos. Emperò, les seves grans contribucions a la Ciència de l'Enginyeria ho son a l'àmbit de la Resistència de Materials i de l'Anàlisi Estructural. Els seus estudis sobre la posició de la fibra neutra en peces prismàtiques sotmeses a flexió, i les hipòtesis sobre la deformació d'aquest tipus de peces, foren determinants per al progrés de la Resistència de Materials⁴⁰. Fou també un gran divulgador d'obres dels seus predecessors, que enriqueix, mitjançant notes al marge, amb les seves experiències i opinions personals. Després d'ocupar posicions de consultor del govern sobre polítiques de ciència i tecnologia per al millorament del país, rebé molts honors, ingressà a l'Acadèmia de Ciències i fou nomenat cavaller de la legió d'honor al 1831.

POISSON (1781-1840)

Un defecte de coordinació del moviments va fer que Simeon-Denis Poisson (nat a Pithiviers, França, al 1781) no fos metge sinó enginyer. En efecte, el seu pare, sense gaire recursos, el va empènyer a ser cirurgià pensant potser que aquesta professió li donaria abundoses oportunitats econòmiques. Tanmateix, l'esmentat defecte de coordinació de moviments li impedia la necessària perícia manual per a tal professió³⁸.



Simeon-Dennis Poisson

D'altra banda, tot el que li mancava de destresa manual li sobrava de capacitat intel·lectual. De fet, tot i que als quinze anys tot just sabia llegir i escriure, després de només dos anys d'estudi intens, Poisson va aconseguir entrar a l'École Polytechnique, al 1798. Sembla ser que, donats els seus migrats recursos econòmics, els seus condeixebles contribuïren, a escot, a pagar-li despeses per tal que podés continuar els seus estudis¹⁶.

A l'École Polytechnique va impressionar a tothom per la seva capacitat, fins al punt de que va ser dispensat de realitzar els exàmens de sortida de l'École. Malgrat això, les seves dificultats de coordinació li feien molt difícil el treball en matèries com el dibuix i la geometria descriptiva, i no va plantejar-se seguir estudis d'enginyeria o de servidor de l'estat com la majoria dels seus condeixebles. Per això, va enfocar la seva carrera cap a la Ciència, i va ser immediatament contractat per a tasques de professor ajudant a l'École on, a l'any 1806, es responsabilitzà de

l'ensenyament del càlcul matemàtic. Al 1812, fou admès a l'Acadèmia de Ciències de París.

Poisson era un home metòdic, que mai enfrontava dos problemes a la mateixa vegada. Segons els seu biògrafs, tenia una curiosa manera de descartar qualsevol interferència amb la investigació que estava portant a terme, encara que fos una idea útil per a altres línies de recerca. En aquest cas, apuntava la informació en una llista que portava al moneder, i que consultaria immediatament després d'acabar la feina que portava entre mans, i se'n oblidava completament.

La *Teoria de la Elasticitat* li deu el reconeixement de l'efecte de contracció lateral associada a la extensió longitudinal, a través de l'anomenat coeficient de Poisson. També molts d'altres desenvolupaments, referits a la propagació d'ones elàstiques, flexió de plaques etc.. Com a mostra de la versatilitat de les seves investigacions, al 1837 va publicar una memòria titulada: *Recerques sobre la probabilitat de judici en matèries criminals i matèries civils*, a on apareix per primera vegada la distribució matemàtica de probabilitat que porta el seu nom: la anomenada *distribució de Poisson*.

ARAGO (1786-1853)

Jean-François-Dominique Arago era un català de Estagell, un poblet al costat de Perpinyà, que entrà a l'École Polytechnique als disset anys i als vint-i-tres ja n'era professor d'Anàlisi i Geodèsia. També va ser-ne després el Director, l'anomenat Comandant en aquella època.

Les seves contribucions científiques mes rellevants, es van produir en el camp de l'Òptica, la Geodèsia i els sistemes de mesura. Va ser director de l'observatori de París, on les seves

l·liçons de Astronomia, obertes al públic en general, van esdevenir cèlebres per la seva admirable claredat¹⁶.

Va formar part de la comissió que mesurà la longitud del arc del meridià terrestre, i que va conduir a la estandardització del sistema mètric. En aquest quefer, participà en una expedició geodèsica per les costes catalanes i mediterrànies, per perllongar la mediació del meridià de Dunkerke-Barcelona, i que sembla una autèntica novel·la d'aventures²²: quan estava acabant les mesures a Mallorca,



Jean François Arago

s'inicià la guerra de entre Espanya i França i es detingut com a espia per les autoritats locals. Aconsegueix escapar-se en un vaixell espanyol que anava a l'Alger, fent-se passar per nadiu, degut a que el català era la seva llengua materna. El vaixell es capturat per pirates i empresonat al nord d'Àfrica. Una vegada alliberat, embarca cap a Marsella, però el seu vaixell es capturat per un vaixell espanyol i empresonat a Espanya. Alliberat de nou, embarca un altra vegada cap a Marsella, però una tempesta el porta cap a Bugia, a Malta. D'allí torna a Àfrica i, disfressat de beduí, arriba a l'Alger on torna a embarcar cap a Marsella. El seu vaixell es perseguit, ara per un vaixell anglès, però finalment arribà a Marsella sa i estalvi i a on fou rebut triomfalment.

El seu caràcter ferri i el seu esperit científic queda reflectit en el fet de que, amb totes aquestes peripècies, aconsegueix salvar els amidaments geodèsics que havia fet, i lliurar-los a la comissió que els hi havia encarregat.

Aragó va tenir una vida pública molt rellevant. Addicionalment a la seva activitat científica, va desenvolupar un intensa activitat política. De conviccions fermament republicanes, va ser aclamat, al febrer del 1848, amb motiu de la arribada al poder del govern provisional de la segona república, com a ministre de guerra i marina. La seva activitat en aquesta posició el portà a fer abolir l'esclavatge a les colònies franceses d'ultramar, i a millorar les condicions de vida dels mariners als vaixells del país. Va morir al 1853.

SAINT- VENANT (1797-1886)

Adhémar Barré de Saint-Venant va ser admès a L'Ecole Polytechnique al 1813, a la edat de setze anys, i ben aviat es va manifestar com el primer de la seva classe. En aquella època l'École havia estat militaritzada per Napoleó Bonaparte, i els seus estudiants eren considerats cadets de l'exèrcit.



Barré de Saint-Venant

Al 1814 els exèrcits aliats s'apropaven a París i els estudiants de l'École foren enviats al front. Saint-Venant, aleshores amb disset anys i amb el grau de sergent primer s'hi va negar adduint: *la meva consciència no em permet lluitar per un usurpador*^{*}. Degut a això va ser considerat un covard i desertor pels seus caps i condeixebles, i va ser fulminantment expulsat de l'École, a on mai més se l'hi va permetre tornar. Quan, vuit anys després, se'l va admetre a l'École de Ponts et Chaussées, va passar-hi dos anys amb el rebuig dels seus condeixebles que mai li

^{*} referint-se a Napoleó

dirigiren la paraula ni compartiren amb ell el mateix escriptori. Malgrat aquest ambient, Saint-Venant, va acabar els seus estudis d'enginyeria com el primer de la seva promoció⁴⁰. Anys després tornaria a l'École de Ponts et Chaussées com a professor de Resistència de Materials.

Les contribucions que es deuen a Saint-Venant en l'àrea de la Teoria de la Elasticitat i de la Resistència de Materials son innombrables. Seus son el estudis de les distribucions tensionals en peces prismàtiques, sotmeses a torsió (l'anomenada *Torsió de Saint-Venant*³). Seu es el principi conegut com *Principi de Saint-Venant* que ens parla de la rellevància, en la determinació del estats tensionals remots, no tant de les forces exteriors com de la seva resultant local, introduint així el concepte fonamental de *esforç* que ha estat fins als nostres dies l'element bàsic de l'anàlisi estructural. Seva es, sobre tot, una posició personal, davant dels defensors de la enginyeria empírica, de que el progrés en la Enginyeria només podria assolir-se si es combinaven la intuïció i la experimentació amb els estudis teòrics rigorosos i el mètode científic....en altres paraules: si la Enginyeria esdevenia Ciència.

La fama de Saint-Venant, com a autoritat en el món de la mecànica de sòlids, s'estengué ràpidament més enllà de les fronteres de França on, com de vegades passa, era més reconegut que a l'interior del país. Només als setanta un anys fou admès com a membre de la Acadèmia de Ciències francesa. La seva activitat científica va continuar intensament fins al final de la seva llarga vida. Va morir, amb vuitanta nou anys, el sis de Gener de 1886.

SOPHIE GERMAIN (1776-1831)

Fins aquí, tots els personatges presentats son homes... i no hauria de estranyar, donat l'allunyament social de la dona del món del coneixement, tant típic l'època que considerem. De fet, la primera dona que ingressà a l'École Polytechnique ho va fer...i al

1972 !³⁶. Tot i això, hi ha el cas singular de Sophie Germain, que val la pena ressenyar.

Va néixer a París al 1776, en el sí d'una família burgesa que, per a protegir-la dels temps turbulents del naixement de la república, la va confinar a la llar paterna, on passava les hores a la biblioteca familiar llegint llibres de matemàtiques. Els seus pares, horroritzats, van intentar allunyar-la d'aquesta afecció, retirant l'escalfor i la llum de la cambra.... Quan la van trobar embolcallada en nombroses capes de roba, treballant a la llum d'espelmes robades i escrivint amb la tinta mig gelada al tinter... van cedir: Sophie es va passar el Regne del Terror estudiant càlcul.



Sophie Germain

El seu desig de entrar a l'École Polytechnique no podia esser complert....així que es va convertir en una *alumna virtual* de l'École.... estudiava a casa seva amb els apunts que li proporcionaven alguns dels alumnes masculins. Va començar a publicar treballs científics sota el pseudònim neutre de *M. Le Blanc*, que era interpretat com *Monsieur Le Blanc*, i amb ell es va cartejar amb científics de la talla de Lagrange i Gauss, que van quedar impressionats pel seu treball i l'encoratjaren a seguir endavant, fins i tot quan van descobrir la seva vertadera identitat. Al 1816 va guanyar el gran premi de l'Acadèmia de Ciències de París i, finalment, va ser acceptada com a membre de la Acadèmia.

Sophie Germain va dedicar-se intensament a les tasques científiques, sobre tot al desenvolupament de mètodes de càlcul estructural, que varen ser aplicats al disseny de la Torre Eiffel ...

gairebé cent anys després ²⁸. Malgrat això, i possiblement per la seva condició de dona, el seu nom no es un dels setanta dos gravats a la façana del primer pis la Torre²⁷, entre els que si que hi figuren Lagrange, Cauchy, Navier, Poisson i Aragó, com a homenatge d'Eiffel als científics que generaren el coneixement per a la seva construcció. Va morir, molt prematurament, als cinquanta-cinc anys, al 1831. A la seva esquela hi figurà com a professió la de *rendista*...a l'època era encara massa difícil admetre el qualificatiu de *científic* per a una dona ³⁹.

IV. -UN EXEMPLE PARADIGMÀTIC: LA ENGINYERIA ESTRUCTURAL

ANTECEDENTS HISTÒRICS

Des de les més remotes civilitzacions els éssers humans han necessitat construir. A mesura que el nomadisme inicial s'anà transformant en sedentarisme, la necessitat de bastir habitatges, vies de comunicació, defenses i construccions en general es feu mes peremptòria. Amb el temps, aquestes construccions es van tornar mes ambiciosos i sofisticades i la experiència va demostrar que no es podia construir de manera arbitrària ... que algunes formes i alguns materials eren mes apropiats que d'altres per a els fins pretesos: resistir l'acció del pes propi i de les accions exteriors de forma fiable i duradora.

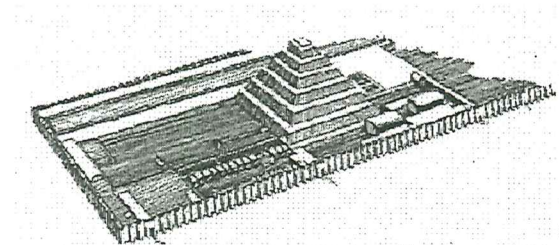


Figura 7: Piràmide de Saqqara (Egipte)

A més, a mesura que s'anava construint va sorgir, d'una manera natural, una divisió funcional de les parts d'una mateixa construcció, de manera de que una part diferenciada s'encarregués

de la resistència a les càrregues a les que estava sotmesa⁴²: es el que anomenem la estructura resistent d'una construcció o, d'una manera més sintètica, *la estructura*.

Així doncs, aviat es feu palès la necessitat de conèixer la capacitat de resistència de les estructures, i dels materials dels que estaven constituïdes, de tal manera que se'n poguessin extreure regles per determinar la forma i dimensions del elements estructurals.

Algunes d'aquestes regles es coneixien ja a l'antic Egipte, altrament no s'haguessin pogut construir els grans monuments, els temples, les piràmides i els obeliscs; construccions que han desafiat el pas del temps i han arribat fins el nostres dies⁴⁰. En aquest sentit, el primer enginyer estructural del que es té notícia sembla ésser *Imhotep* constructor de la piràmide esglaonada de Saqqara al voltant del 3000 a.C (vegeu la Figura 7).



Figura 8: Aqüeducte de Segovia

Els antics Grecs tenien ja coneixements de mecànica (la famosa palanca d'Arquimedes n'és un exemple) i els aplicaren a la construcció d'estructures atrevides en temples i palaus.

Els seus coneixements foren heretats pels enginyers de l'antiga Roma. L'obra mestre de l'enginyeria estructural romana es el famós Panteó construït el 123 a.C. que romangué durant gairebé divuit segles, amb els seus 44 metres de llum, com la cúpula mes gran del mon (vegeu la Figura 9). Tot i això el seu disseny està basat, de nou, en principis totalment empírics i en una excepcional explotació del sistema constructiu per alleugerir-ne el pes.



Figura 9: Interior del Panteó de Roma, pintat per Giovanni Paolo Panini.

Gran part del coneixement d'enginyeria estructural que tenien grecs i romans es va perdre a la edat mitjana i no es va poder recuperar fins al renaixement. En el segle XVI *Andrea Palladio* va fer servir les primeres cintres en la construcció de

ponts i sostres d'edificacions, però els seus dissenys no tenien una base racional. El propi Palladio expressava en les seves obres que:

*.... per al seu dimensionalment no es possible establir regles certes i determinades*³⁷.

No fou fins a començaments del segle XVII que el renaixement va estimular el retrobament, entre tantes d'altres coses, de les antigues tecnologies i la formulació de noves preguntes. L'esforç per donar una base mes racional al disseny de les estructures i construccions, i d'entendre el comportament resistent dels materials de construcció, passa per Galileo, Hooke, Mariotte, Parent, Jacob Bernoulli, Euler i Coulomb, entre alguns d'altres. Així doncs, un breu recorregut històric a través d'aquestes figures ens proporcionarà els elements de judici sobre la situació de l'anàlisi estructural al començament del període que ens interessa.

GALILEO GALILEI

Galileo (1564-1642) inaugurà la edat de la raó en el disseny estructural. Fou el primer en estudiar la resistència dels sòlids davant la fractura. En el seu famós llibre *Diàlegs sobre dues noves ciències* (vegeu la Figura 10), personatges ficticis, el mestre, Salviati, i els seus deixebles Sagredo i Simplicio, dialoguen en quatre jornades sobre diverses qüestions de la mecànica dels materials i les construccions, introduint el pensament i descobriments de Galileo.



Galileo Galilei



Figura 10: Portada de *Diàlegs sobre dues noves ciències* (Galileo, 1638)

Amb una ampul·lositat que avui dia ens pot semblar ingènua, Salviati/Galileo exposa als seus deixebles les seves teories sobre la Mecànica i la Resistència de Materials. El seu missatge podria ser sintetitzat en les següents punts:

- ➔ Galileo disposa només dels conceptes mecànics d'equilibri que li arriben dels filòsofs grecs, a través dels tractats d'Aristòteles i d'Arquimedes. Aplica el concepte d'equilibri de moments a partir de la llei de la palanca, que justifica en llargs paràgrafs dels seu diàlegs* (vegeu la Figura 11).

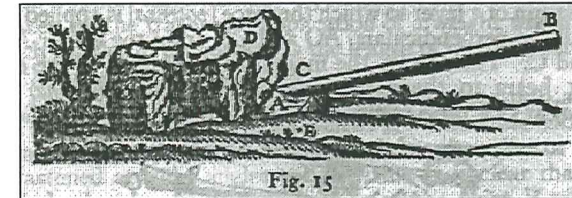


Figura 11: Estudi sobre al llei de la palanca (*Diàlegs sobre dues noves ciències*, Galileo, 1638)

- ➔ Per primera vegada tracta, el concepte de la ruptura del material. Els seus estudis sobre peces cilíndriques o prismàtiques a tracció, introdueixen el concepte de fibres longitudinals (per analogia amb una corda, vegeu la Figura 12), i la resistència a la ruptura de la peça com la suma de la resistència de cada fibra (vegeu l'Annex II).
- ➔ Galileo encara està lluny de entendre el mecanisme de treball de les peces prismàtiques. Li manquen els conceptes de deformació i de tensió, que no arribarien fins a molt després: el primer amb els treballs de Hooke i Mariotte, i el segon amb els de Cauchy. Així, quan analitza mènsoles, cilíndriques o prismàtiques, sotmeses a flexió, sota forces puntuals al seu extrem d'empotrament (Figura 13), associa la causa de la ruptura als valors de les forces de normals de reacció a la part inferior de la secció d'empotrament (vegeu l'Annex III)

* Vegeu a l'Annex I una justificació que no demanaria més de tres línies a un estudiant d'ensenyament secundari dels nostres dies.

- ➔ La resistència a la ruptura que calcula equival a una distribució uniforme de l'acció* sobre la secció transversal de la peça...lluny doncs de la correcta distribució lineal que

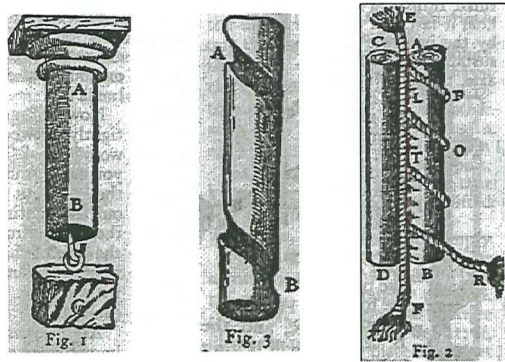


Figura 12: Estudi de peces a tracció (*Diàlegs sobre dues noves ciències*, Galileo, 1638)

avui acceptem com a correcta.

- ➔ El tractament que fa en els seus estudis, correspon sempre al de sòlid indeformable i està encara molt lluny d'esbrinar els mecanismes de treball de peces hiperestàtiques.

Tot i això es rellevant com, mitjançant experiments i principis heurístics, Galileo va poder aproximar-se a alguns principis de la mecànica de la ruptura.

* S'utilitza aquí la paraula *acció* en el sentit equivalent a *tensió*, tot i que aquest concepte no era encara conegut per Galileo.

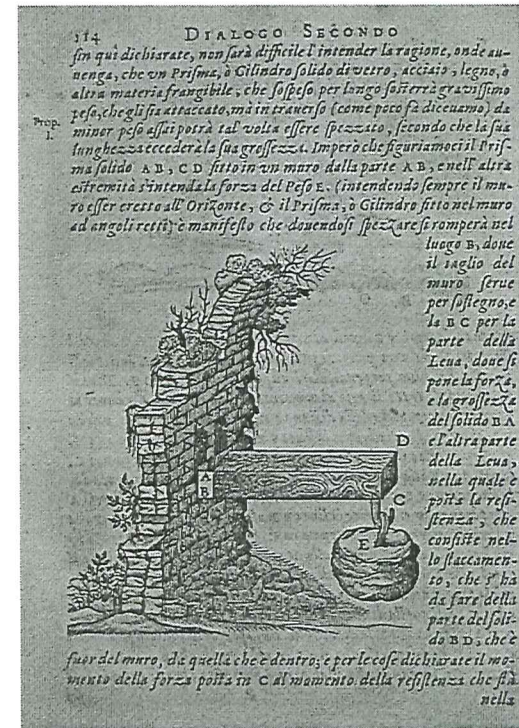


Figura 13: Estudi de ruptura de ménsules (*Diàlegs sobre dues noves ciències*, Galileo 1638)

ROBERT HOOKE

Robert Hooke (1635-1703) ha estat de vegades anomenat el Leonardo anglès⁴,⁹ per la amplitud del seus coneixements i del seus àmbits de recerca. Nascut a la illa de Wright (Regne Unit) estudià a Oxford on un dels seus professors fou el famós químic Robert Boyle amb el que després mantingué una intensa correspondència científica (vegeu la Figura 14). Al 1662 esdevingué el conservador d'experiments de la Real Societat (de Ciències) de Londres i, al 1667, en fou nomenat secretari.



Robert Hooke

Va ser autor de nombroses contribucions científiques en els camps de la botànica, (es molt conegut el seu llibre *Micrographia*²³ sobre observacions amb un microscopi de la seva invenció, i on va formular una teoria ondulatoria sobre la llum) la física i la química.

Tot i això, i en el que es refereix a l'anàlisi estructural, la seva contribució més important es l'estudi de les propietats elàstiques dels materials. En el seu llibre *Lectures de potentia restitutiva*²⁵, publicat al 1678, va investigar les propietats elàstiques de objectes simples i molles flexibles que avui condensem en la famosa *Llei de Hooke*:

$$\sigma = E \varepsilon$$

que estableix la proporcionalitat entre la tensió, σ , i la deformació, ε , a través d l'anomenat mòdul d'elasticitat, E .

El format actual d'aquesta fórmula, la primera esmentada en qualsevol tractat d'Elasticitat o de Resistència de Materials, no fou, ni molt menys, el que emprà Hooke per definir la seva llei.

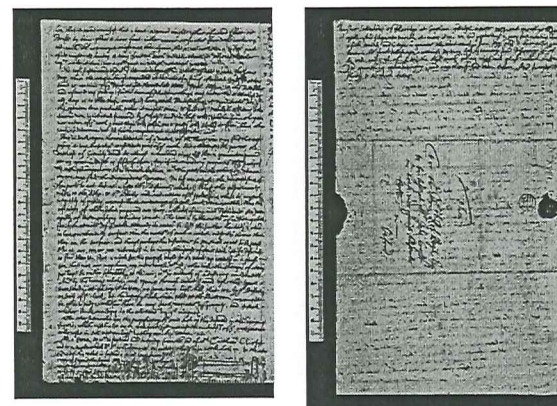


Figura 14: Carta de Robert Hooke a Robert Boyle

Ans al contrari, al regust de la retòrica científica de l'època, Hooke en el seu llibre *Description of Helioscopes*²⁴ donà una primera formulació de la seva llei en forma del següent anagrama:

cediinnoopsssttuu

del que en donava la solució, dos anys després, en el tractat *De potentia restitutiva*²⁵ (vegeu la Figura 15):

Ut Pondus sic Tensia

que es traduiria literalment per:

com es el pes així es la tensió*.

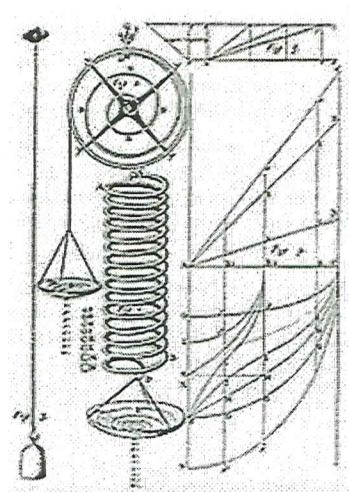


Figura 15: Esquema de l'estudi de propietats elàstiques a *De Potentia Restitutiva* (Robert Hooke, 1678)

Però les contribucions de Hooke a l'Anàlisi Estructural no acaben en la llei que porta el seu nom. Al 1705, en l'obra *Description of Helioscopes* proporciona un altre anagrama (vegeu la Figura 16):

abcccddeeeefggiiiiiiillmmmmnnnn
ooprrsstttttuuuuuuux

que, segons manifesta, es:

* la paraula *tensió* no correspon aquí al concepte actual d'aquest terme sinó, mes aviat, al concepte de *d'allargament* o *de deformació*. La traducció, no literal, però mes acurada, de l'anagrama seria dons: *com es la força* (que se li fa la molla) *així es* (proporcional) *l'allargament* (de la molla)

..la verdadera forma matemática per tota mena d'arcs per a edificis..

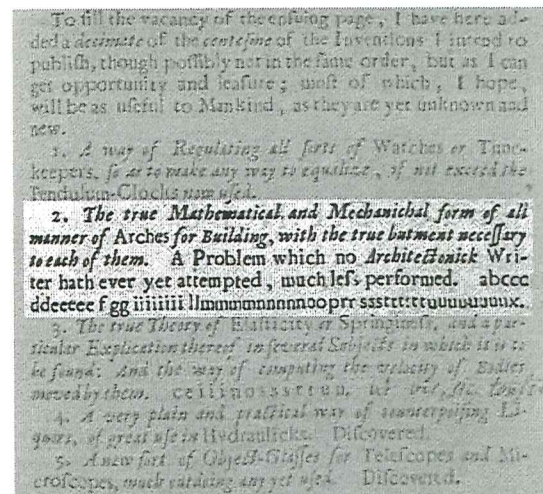


Figura 16: Anagrama sobre les formes anti-funculars (*Description of Helioscopes*, Robert Hooke, 1705)

Aquest anagrama, una vegada desxifrat* diu:

Ut pendet continuum flexile, sic stabit
contiguum rigidum inversum

que es pot traduir per:

* l'anagrama no fou desxifrat en vida de Hooke sinó que fou revelat pel seu marmessor testamentari a la seva mort, al 1705.

...Així com penja in cable flexible, així invertit, així es troben les peces contigües d'un arc,...

on s'hi pot reconèixer que la forma òptima d'un arc per aguantar el seu pes es la d'una catenària^{*} invertida. A més son rellevants algunes contribucions de Hooke a l'anàlisi de la deformació de bigues a flexió com a elements elàstics (vegeu la Figura 17).

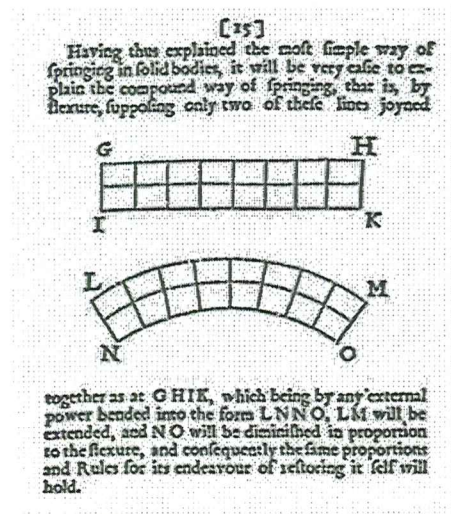


Figura 17: Estudi de mecanismes flexibles i de flexió de bigues a *De potentia restitutiva* (Robert Hooke, 1678)

Com en el cas de Galileo, les contribucions de Hooke a l'anàlisi estructural son plenes d'empirisme i de intuïció, però estan

^{*} forma que adopta una cadena subjecte pels seus extrems sota el seu propi pes.

lluny de sorgir d'un tractament científic rigorós. Més específicament:

- Tot i que, en l'anomenada *Llei de Hooke* introduïm avui dia la paraula *deformació*, aquest concepte no està descrit d'una manera clara en el seus treballs i està, en tot cas, limitat a la deformació longitudinal d'una barra o molla^{*}.
- El concepte de tensió, tal i com l'entendem avui dia, no fou copsat per Hooke ni per la forma original de la llei que porta el seu nom. Aquesta es referia, essencialment, a la proporcionalitat entre forces i desplaçaments d'elements elàstics.
- La gran aportació de Hooke en l'àmbit de l'anàlisi estructural, fins i tot més enllà de la llei de Hooke, es la identificació del caràcter restitutiú dels medis elàstics respecte a les forces que se'ls hi apliquen ... un aspecte fonamental de la moderna *Teoria de la Elasticitat*.

EDME MARIOTTE

Edme Mariotte (1620-1684) va néixer prop de Dijon (França) on ben aviat va prendre les ordres religioses arribant a ésser l'Abad del Priorat de St. Martin de Beaumont-sur-Vingeanne. Dés de ben aviat començà a destacar per les seva recerca científica que el va portar, al 1666, a ser un dels primers membres de la recentment instaurada Acadèmia de Ciències de Paris.

^{*} En els treballs de Hooke es parla essencialment de *elongació* (allargament) i no de *deformació* (allargament per unitat de longitud). Seria doncs inacurat parlar de Hooke com a introductor del concepte de deformació tot i que aquest terme es l'emprat en la moderna formulació de la Llei de Hooke.

Mariotte es va caracteritzar pel rigor dels seu tractaments científics que demandaven una exhaustiva corroboració experimental a qualsevol teoria abans de donar-la per vàlida¹². En aquest sentit va refutar, mitjançant senzills experiments, algunes propostes de famosos coetanis, com la teoria de Newton sobre la naturalesa dels colors de la llum (vegeu la Figura 18) i també les teories de Galileo sobre la flexió de bigues en els *Diàlegs sobre dues noves ciències*.



Edme Mariotte

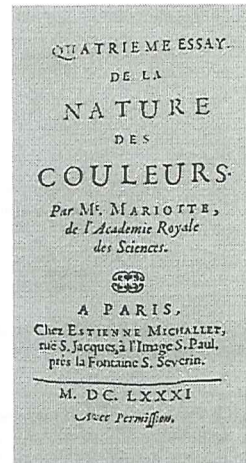
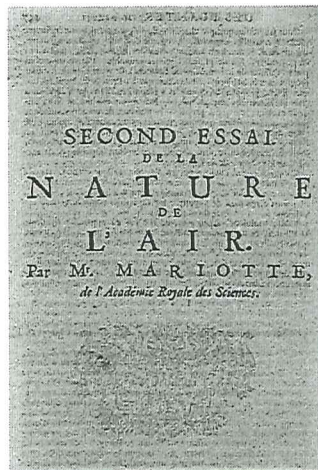


Figura 18: Assaigs científics de Edme Mariotte (1681)

La seva contribució científica més rellevant va ser la que avui es coneguda com a *lleï de Boyle-Mariotte*, sobre la compressibilitat dels gasos.

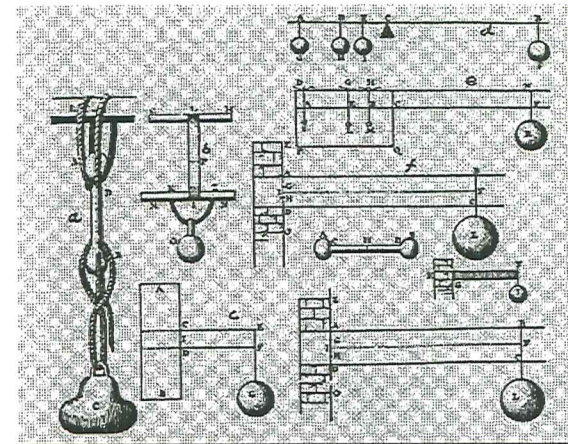


Figura 19: Estudis sobre comportament a tracció i flexió de bigues de Edme Mariotte²⁹

En el camp de l'anàlisi estructural, les contribucions de Mariotte estan centrades en la resistència de peces prismàtiques a tracció i de bigues a flexió, que va portar a terme, encuriósit per millorar la resistència dels tubs, mentre dissenyava el sistema de portada d'aigües al palau de Versalles. Heus aquí els seus resultats:

- ➔ Anant més enllà que Galileo, Mariotte va intuir que la distribució de l'esforç sobre la secció transversal sobre

¹² independentment i simultàniament descoberta per Robert Boyle, a Anglaterra, i Edme Mariotte, a França, al 1662

una biga a flexió no era uniforme (tal com postulava Galileo) sinó lineal. En certa manera, i en combinació amb la llei de Hooke, això suposava la introducció implícita de la hipòtesis de deformació plana de la secció transversal de la biga, que fou definitivament establerta per Euler i Jacob Bernoulli molts anys més tard. Aquesta hipòtesi li va permetre acostar-se amb més precisió a la càrrega de ruptura d'aquestes estructures estimant-ne una resistència que era dos terços de la calculada per Galileo (vegeu la Figura 20).

- Tot i això, la seva hipòtesi situava, de forma errònia, la fibra neutra, a la part inferior de la secció transversal de la biga.

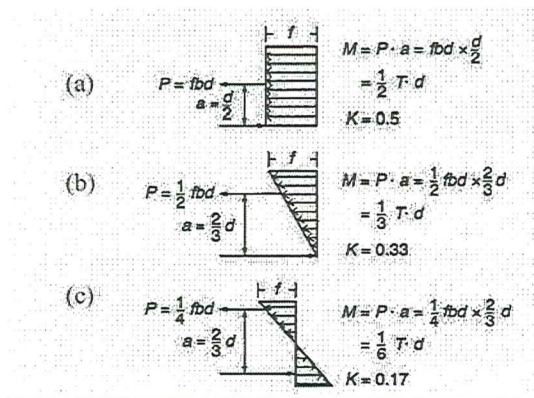


Figura 20: Evolució de la estimació de la distribució de l'esforç flector, M , sobre una secció de peça prismàtica a flexió: a) Galileo (1638) b) Mariotte (1670) c) Parent (1713)

JACOB BERNOULLI

Jacob Bernoulli (1654-1705) fou un més dels il·lustres membres de la família Bernoulli*, i l'iniciador de la saga (vegeu la Figura 21). La família Bernoulli era originària de Flandes d'on havia emigrat al 1567, fugint de la persecució del Duc d'Alba contra els protestants, cap a Basel (Suïssa) on s'establiren, i a on Jacob obtingué després la càtedra de matemàtiques.



Jacob Bernoulli

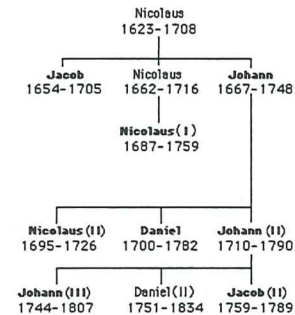


Figura 21: Arbre genealògic de la família Bernoulli (en negreta els membres més eminents de la saga)

* Família d'il·lustres científics dels segles XVII i XVIII. Els més rellevants foren: Jacob Bernoulli (1654-1705), el seu germà Johann (1667-1748), el seu nebot Nicolaus I (1687-1695) i els fills de Johann: Daniel (1700-1782) i Nicolau II (1695-1726). En un cert moment, a començament del segle XVIII, cinc membres de la família Bernoulli ocupaven simultàniament càtedres a les més rellevants universitats europees.

Mentre Galileo y Mariotte es dedicaren a estudiar les condicions de ruptura de les estructures, Jacob Bernoulli en va començar a estudiar la seva deformació. Sol associar-se el nom de Jacob Bernoulli com el primer en utilitzar la hipòtesi de deformació plana de la secció transversal d'una peça prismàtica*. La rotació de la secció, emperò, es produïa, segons Bernoulli, de manera que la fibra neutra es situava a l'extrem inferior de la secció i, per tant, els resultats, en quant a la capacitat resistent de una peça prismàtica a flexió, eren iguals als obtinguts per Mariotte (vegeu la Figura 20) i, per tant, erronis.

Però els resultats de Bernoulli en quant a la deformació de peces prismàtiques foren molt més precisos. Seva va ser la primera contribució analítica a la flexió elàstica d'una biga que publicà en forma de logogrif al 1691:

Qrzumubapt dxqopddbbp...

del qual en donà el codi³⁵ per desxifrar-lo al 1694. El resultat descodificat[†] es:

Portio axis applicatem.....

establint els conegut resultat de que el radi de curvatura de la peça flectada es inversament proporcional al moment flector aplicat.

Alguns resultats de Jacob Bernoulli sobre integració de corbes elàstiques, es poden trobar a les Actes de l'Acadèmia de Ciències de París⁵ (vegeu la

* avui dia denominada *hipòtesi de Bernoulli*

† la clau per a la descodificació del logogrif es la següent: la primera lletra de la sèrie es reemplaçada per la següent en l'alfabet llatí, la segona lletra per la situada tres posicions més enllà i la tercera per la situada sis posicions més enllà. Per la quarta lletra es torna a començar el procés. Típicament *aaaaa* es descodificaria com a *bdgbd*.

Figura 22).

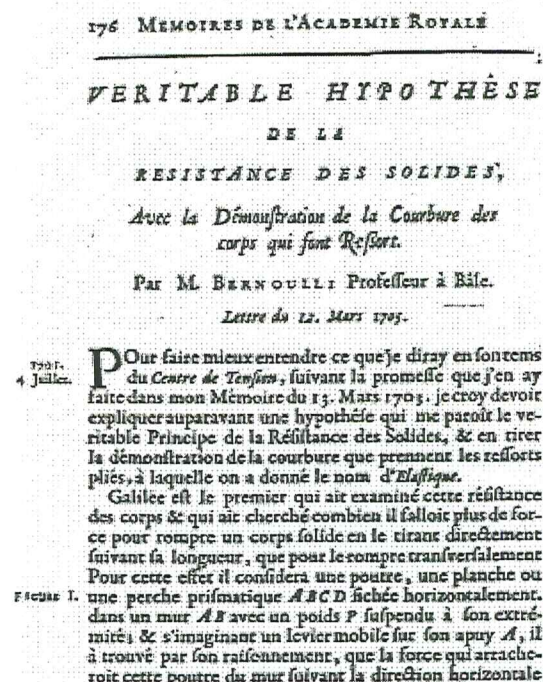


Figura 22: Estudi de Jacob Bernoulli, a les Actes de l'Acadèmia de Ciències de París, sobre el comportament elàstic de bigues (1704).

ANTOINE PARENT

Antoine Parent (1666-116) va néixer a Paris on va estudiar dret, per imposició paterna, però mai el va exercir. Ben aviat es va dedicar a l'estudi, i a l'ensenyament, de les matemàtiques i la mecànica.

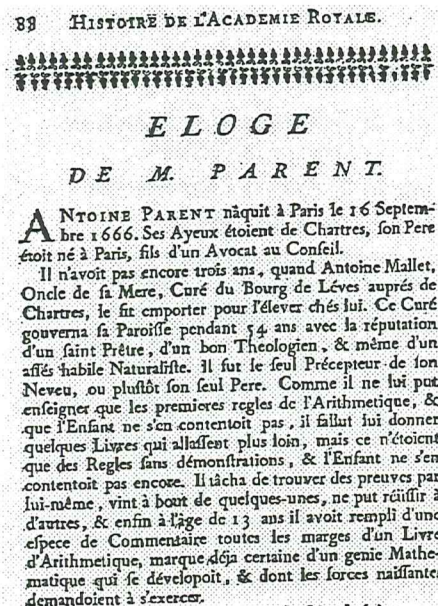


Figura 23: Elogi de A. Parent a *Historia de l'Acadèmia de Ciències de Paris*, de Fontanelle (1716)

Com a ajudant d'altres acadèmics va participar en nombroses tasques científiques a l'Acadèmia de Ciències de Paris. encara que no en fou membre fins a pocs mesos abans de la seva mort. Va publicar nombrosos treballs i memòries com *Éléments de mécanique et de physique* (Paris, 1700) i *Recherches de physique et de mathématiques*³³.

La contribució més important de Parent a la mecànica estructural, esdevé quan discuteix la posició de la fibra neutra en bigues a flexió i la situa, corregint els errors de Galileo, Mariotte i Jacob Bernoulli, de manera correcta en el centre de gravetat de la secció transversal (vegeu la Figura 20).

LEONARD EULER

L'insigne matemàtic Leonard Euler (1707-1783) va néixer a Basel (Suïssa) on va tenir la oportunitat d'assistir a les classes de matemàtiques de Johann Bernoulli qui, al adonar-se de les seves especials aptituds per la ciència, el va prendre com a alumne predilecte. Va desenvolupar una gran part de la seva carrera científica a Rússia, cridat per la zarina Alexandra II, a la Acadèmia de Ciències de Sant Petersburg.

Euler es conegut, i reconegut, per les seves contribucions a les matemàtiques, especialment a la creació del Càlcul



Leonard Euler

infinitesimal. Però també va tenir una important contribució al anàlisi estructural; especialment en la seva investigació sobre les corbes elàstiques*.

Aprofitant el seu coneixement de les noves eines matemàtiques que ell contribuïa a desenvolupar, les aplicà al plantejament i resolució de les equacions diferencials de corbes elàstiques. Així, va deduir la equació diferencial de una mènula a flexió per una càrrega P al seu extrem⁴⁰:

$$C \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} = Px$$

equació a la que ja havia arribat Jacob Bernouilli amb anterioritat (vegeu Figura 24). Euler¹⁷ la va integrar, arribant a la equació de la elàstica i de la fletxa, f , a l'extrem carregat†:

$$f = \frac{Pl^3}{3C}$$

D'una manera similar Euler va explorar les corbes elàstiques de peces prismàtiques rectes sotmeses a diverses situacions de càrrega.

* Deformades geomètriques de peces prismàtiques planes sotmeses a diferents tipus de càrregues.

† Avui reconeixem exactament aquesta formula tot donant a la constant el valor $C=EI$, on E es el mòdul de Young i I es el moment d' inèrcia respecte a l'eix de flexió (proporcional a la tercera potencia del cantell). Euler, però va establir, erròniament, la proporcionalitat de C a la segona potencia del cantell de la biga.

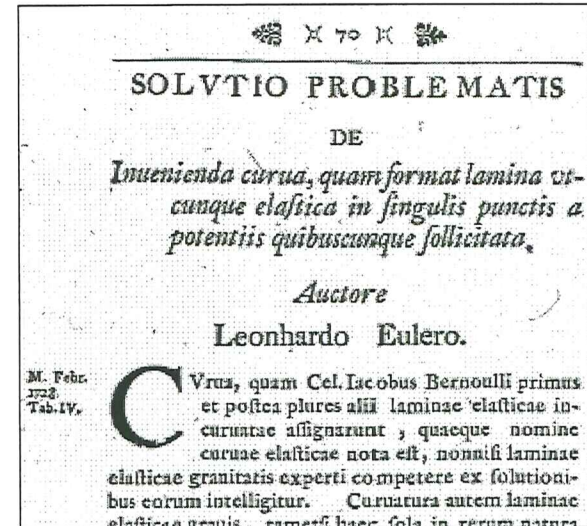


Figura 24: Primera pàgina del treball d'Euler del 1728 sobre corbes elàstiques (observeu la menció inicial a Jacob Bernouilli)

Els treballs de Jacob Bernouilli i Leonard Euler van deixar pràcticament enllestida la teoria de flexió de bigues rectes. Es per això que, tradicionalment, els llibres i manuals d'Anàlisi Estructural han anomenat *biga de Euler-Bernouilli* a la teoria per l'estudi de bigues a flexió pura. Però recentment i han hagut novetats....

.....i un nou (vell) vingut:

LEONARDO DA VINCI

La figura de Leonardo da Vinci (1452-1519), sempre controvertida per la seva genialitat multi-disciplinària, també apareix en els orígens de la Mecànica Estructural. Malgrat que la historiografia clàssica⁴⁰ no li atorga un paper rellevant al respecte, i situa els orígens de l'enginyeria estructural en Galileo (cents anys després de Leonardo), un descobriment bibliogràfic recent ha canviat aquest concepte. El denominat Manuscrit de Madrid⁴, descobert al 1967 a la Biblioteca Nacional d'Espanya, i que havia romàs desaparegut durant mes de cinc cents anys, aporta proves de que Leonardo havia avançat, encara més que Galileo, en la solució correcta de la, avui encara denominada, teoria de bigues de Euler-Bernoulli. De fet, el concepte de fibra neutra, i de deformació lineal al llarg del cantell de la biga, clau en aquesta teoria, sembla ja formalitzat en aquest document quan s'afirma (vegeu la Figura 25):



Leonardo da Vinci

...Sobre la flexió de molles (peces elàstiques): Si una peça recta flecta, es necessari que la seva part convexa esdevingui més gruixuda i la part còncava més estreta. Aquesta modificació es piramidal i, conseqüentment, no hi haurà mai canvis en la meitat de la peça. Descobrireu, si considereu totes les anteriors modificacions, que dividint la peça en dues parts per la meitat a-b de la seva longitud i flectant aleshores la peça de manera que les dues línies paral·leles a-b es toquin a la part inferior, la distància entre elles ha

creixcut a la part superior en la mesura que ha disminuït a la part inferior.

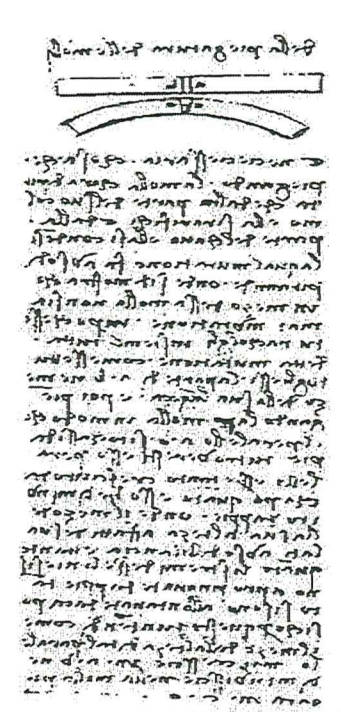


Figura 25: Reproducció del foli 84 del Codi de Madrid (manuscrit original de Leonardo de Vinci) sobre la teoria de bigues. Tal i com era costum en Leonardo, el manuscrit està escrit en imatge especular (d'esquerra a dreta).

En conseqüència, en el centre de la seva alçada s'ha comportat com una balança respecte als dos costats. I els extrems de las línies s'han ajuntat tant en la part inferior com s'han separat a la part superior. D'això n'entendreu perquè en el centre de l'alçada de les paral·leles mai augmenta en a-b ni disminueix a la peça flectada....

Així doncs, sembla ser que la història clàssica de l'anàlisi estructural ha de ser modificada ... i acceptar que gran part de les teories de *Jacob Bernoulli* i *Leonard Euler*, sobre flexió de bigues rectes, ja havien estat proposades per *Leonardo da Vinci* cent anys abans.

En aquest sentit sembla totalment apropiada la recent proposta² de que l'anomenada *Teoria de bigues de Euler-Bernoulli* passi a denominar-se *Teoria de bigues de Da Vinci-Euler-Bernoulli*.

CHARLES AGUSTIN COULOMB

Charles Agustin Coulomb (1736-1806) es molt conegut pels seus treballs científics sobre l'electromagnetisme, però fou també l'autor de contribucions molt rellevants en els camps de la mecànica i de l'anàlisi estructural.



C.Agustin Coulomb

Enginyer militar com era, fou enviat a les possessions franceses d'ultramar (a la illa de Martinica) per realitzar i supervisar treballs de fortificació, la qual cosa li va donar la oportunitat d'iniciar recerques sobre propietats mecàniques dels materials i, especialment, sobre

la fricció entre cossos, dels que en sorgí la coneguda *lleï de fricció de Coulomb*. En relació amb aquest tema, Coulomb emergeix com un dels fundadors de la *Geotecnia* al desenvolupar la primera teoria matemàtica per al càlcul de la empenta dels terrenys sobre els murs¹⁹.

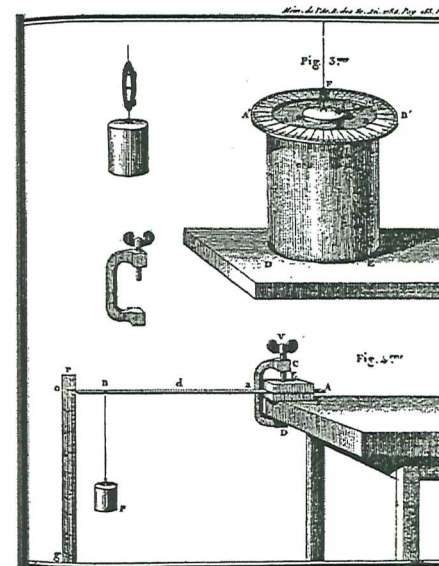


Figura 26: Dispositiu experimental de Coulomb per a la realització d'estudis sobre la torsió.

En el camp de l'anàlisi estructural Coulomb va continuar alguns dels treballs dels seus predecessors sobre flexió de bigues

arribant a solucions de la resistència de bigues a flexió essencialment correctes*.

La seva contribució més important a l'enginyeria estructural[†] es va produir, emperò, en l'estudi del fenomen de la torsió i la seva caracterització per a diversos materials^{10, 11}. La simple, i elegant, solució de Coulomb al problema de la torsió de peces cilindres, fou molt important per la seva aplicació a la balança de torsió, que va proporcionar als físics una manera de mesurar forces extremadament petites. D'aquest treball s'ha dit^{1, 20}:

...Coulomb va desenvolupar una teoria de la torsió de seda fina i fils de cabell...

Coulomb pot ser considerat un precursor de l'esperit que va impregnar el naixement de l'École Polytechnique, pocs anys abans de la seva mort, tot i que, per una qüestió d'edat, mai en va ser ni alumne ni professor. Enginyer per formació i per vocació, i dotat d'una ment rigorosa, va percebre la necessitat d'aplicar els mètodes i coneixements científics a la enginyeria. El camí que ell va obrir va ésser seguit ben aviat per altres...

RESUM DE SITUACIÓ...

El recorregut històric que s'ha fet fins ara, ens ha portat als finals del segle XVIII on ens trobem amb una situació de l'enginyeria estructural que es podria resumir així (vegeu la Taula 5):

* retrobant, alguns resultats, ja proposats anteriorment per Parent però que Coulomb, aparentment, no coneixia.

† tot i que sembla clar que Coulomb no va desenvolupar la seva teoria de la torsió per aplicacions estructurals, sinó per aplicar-la a la balança de torsió per a mesura de propietats físiques.

- Si bé en algunes tipologies determinades s'havia arribat a solucions que avui dia considerem correctes (biga de Da Vinci-Euler-Bernouilli, torsió de Coulomb etc) aquestes tipologies eren molt simples. Típicament només hi havia respostes (parcials) sobre el comportament estructural de peces prismàtiques planes i de directriu recta (bigues planes, filaments a torsió etc.)^{*}.
- Aquestes respostes es limitaven a la determinació de la resistència i de la deformació en peces isostàtiques, a tracció, compressió, flexió pura i (parcialment) a torsió. L'efecte de les deformacions en les sol·licitacions (peces hiperestàtiques) romanien totalment inexplorats.
- Els efectes, bi-dimensionals o tri-dimensionals, transversals de la deformació eren majoritàriament ignorats i els tipus d'accions estaven limitats a càrregues puntuals o de superfície.
- No es pot parlar de l'anàlisi estructural com una disciplina científica. Si bé es ben cert que eminents científics, com es ara Euler i Bernouilli, feren algunes incursions en l'anàlisi estructural, l'objectiu era no tant fer-lo progressar com a una nova ciència, com usar-lo com a camp de proves per l'aplicació dels seus descobriments en altres disciplines (les matemàtiques o la mecànica).
- La ciència que hi havia no s'aplicava al camp de l'enginyeria. En el petit món científic de la època, els nous descobriments eren patrimoni de un reduït grup d'iniciats i el procés d'aplicació pràctica massa lent. Els canals de distribució d'aquest nous coneixements (les Universitats i les Acadèmies de Ciències) arribaven a un nombre molt

* Es cert que hi havia hagut alguns intents, com els de Euler, de estudiar tipologies més complexes, com es ara membranes o plaques. Però no es poden considerar com a reeixits.

reduït de persones i, encara mes escassament, a persones interessades en l'enginyeria.

NOM	DATES	OBRES MES RELLEVANTS SOBRE MECÀNICA ESTRUCTURAL	APORTACIONS A L'ANÀLISI ESTRUCTURAL
Leonardo DA VINCI	1451-1519	Manuscrit de Madrid	Deformació plana de la secció transversal en bigues.
Galileo GALILEI	1564-1642	Discorsi e Dimostrazione Matematiche intorno a due nuove scienze (1638) - Della scienza meccanica (1649)	Estàtica de cossos rígids. Resistència a ruptura de bigues.
Edme MARIOTTE	1620-1684	Traité de la percussion et du choc des corps (1677) - Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides (1684)	Deformació plana de la secció transversal de bigues. Eix neutre inferior.
Robert HOOKE	1635-1703	Description of Helioscopes (1676) - De potentia restitutiva (1678)	Proporcionalitat entre esforços i deformacions en peces a tracció. Restitució elàstica.
Jacob BERNOULLI	1654-1705	Opera omnia (1744)	Deformació plana de la secció transversal de bigues. Eix neutre inferior.
Antoine PARENT	1666-1716	Eléments de Mécanique et de Physique (1700)	Deformació plana de la secció transversal de bigues. Eix neutre al centre de gravetat
Leonard EULER	1707-1783	Solutio problematis de invenienda curva... (1728) - Methodus inveniendi lineas curvas... (1744)	Teoria de bigues. Integració de la equació de la elàstica.
Charles Agustin COULOMB	1736-1806	Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion... (1785)	Teoria de torsió en peces cilíndriques.

Taula 5: Evolució cronològica de la Mecànica Estructural abans de l'École Polytechnique: de Leonardo a Coulomb.

- Les noves ciències fonamentals i l'enginyeria eren més totalment dissociats. Les primeres responien a objectius filosòfics (la voluntat de comprendre la naturalesa de les coses); la segona romanien en l'àmbit de l'empirisme gairebé absolut.

Així eren les coses a l'enginyeria estructural quan l'École Polytechnique va obrir les seves portes al Desembre de 1794.

L'ANÀLISI ESTRUCTURAL I L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Vegem doncs quina es la evolució de l'anàlisi estructural en un període immediat a l'anterior, però molt més curt: els aproximadament cinquanta anys que van des de la fundació de l'École Polytechnique fins a mitjans del segle XIX. I ens referirem, només, als treballs i desenvolupaments per part d'un nombre molt limitat d'alumnes de l'École Polytechnique, de la que, després, molts d'ells n'esdevingueren professors; per ordre cronològic de naixement: Poisson, Navier, Poncelet, Cauchy, Lamé, Saint-Venant i Clapeyron.

POISSON

Ja s'ha parlat* de les capacitats per a les matemàtiques i per a la Ciència de Simeon Denis Poisson. Ben aviat es va interessar per l'anomenada *teoria de les forces moleculars* per a explicar les forces y accions en un medi elàstic†, arribant a les equacions

* Vegeu la pàgina 39

† Essencialment, la teoria considerava al medi elàstic com a un conjunt de molècules, sotmeses a forces mútues d'atracció i de repulsió del tipus que exerceixen les molles.

diferencials que descriuen l'equilibri d'un conjunt infinit de molècules sotmeses a forces d'atracció i repulsió moleculars (vegeu la Figura 27), formulant-ne també les equacions de contorn. Va demostrar també que aquestes equacions era necessàries i suficients per a assegurar l'equilibri de qualsevol part del cos elàstic⁴⁰. En aquest context va estudiar també la propagació d'ones en un medi elàstic.

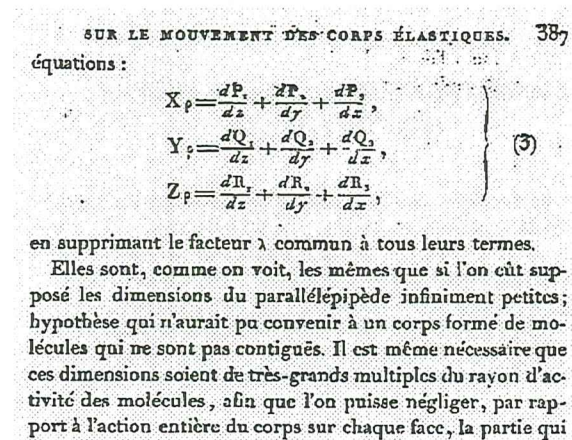


Figura 27: Fragment d'un treball de Poisson³¹ sobre la teoria de forces moleculars en un medi elàstic. En les equacions (3) s'hi pot reconèixer una primera aproximació a les actuals equacions d'equilibri intern d'un medi continu.

Tot i aixó, la contribució fonamental per la que Poisson es conegut avui dia en l'anàlisi estructural, es el reconeixement, per primera vegada, de l'efecte de contracció lateral associat a la

elongació longitudinal (l'anomenat efecte Poisson^{*}). Mes tard, Poisson va aplicar les equacions de la Teoria de la Elasticitat a diverses tipologies estructurals: plaques rectangulars i circulars, amb diverses condicions de contorn, sota carregues estàtiques i dinàmiques, peces prismàtiques a torsió etc.

La contribució de Poisson a l'anàlisi estructural, no fou tant en termes de desenvolupament de teories fonamentals, tal com feren Cauchy i Navier, per exemple, com en la seva aplicació a problemes específics. De la seva activitat acadèmica a l'École Polytechnique, destaca el famós llibre de text *Traité de Mécanique*³⁴, publicat al 1811.

NAVIER

Louis Marie Henri Navier, del que ja se'n ha fet una ressenya històrica[†], fou el prototip d'enginyer científic, tant interessat en els aspectes teòrics de la enginyeria com en les seves vessants mes aplicades.

Navier, va exercir un intensa activitat com a editor i revisor d'obres científiques d'altri, que anà comentant i posant al dia mitjançant notes al marge. En aquest sentit destaquen les seves edicions de l'obra de Belidor *La Science des Ingénieurs*. Al 1826 va publicar la primera edició del seu llibre sobre *Resistència de Materials*, que resumia les seves classes sobre la matèria i que incloïa els resultats de les seves darreres recerques, el qual va ser una obra de referència arreu del món per l'ensenyament d'aquesta disciplina en les Escoles d'Enginyeria durant els següents cent anys. Precisament, el seguiment de les seves publicacions permet

* Aquest efecte, fàcilment retrobable experimentalment, fou descobert per Poisson de manera analítica, aplicant les seves equacions a una barra de material elàstic isotròpic traccionada longitudinalment

† Vegeu la pagina 37

adonar-se de la tremenda progressió que va tenir l'anàlisi estructural en el període que considerem.

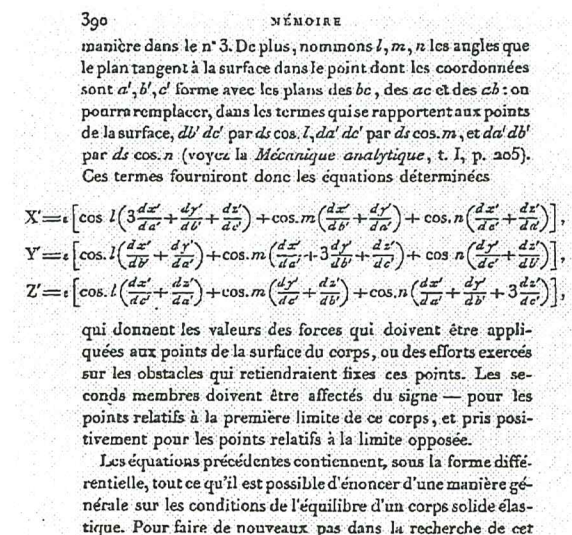


Figura 28: Fragment d'un treball de Navier³¹ sobre les equacions d'equilibri en un medi elàstic.

En el camp de la Teoria de la Elasticitat va a desenvolupar la *teoria de les forces moleculars*, que fou continuada després per Poisson i Cauchy, arribant a equacions de equilibri (vegeu la Figura 28). que feien ja intuir les que després consolidaria Cauchy.

Ja en el camp de l'anàlisi d'estructures, tot i que va començant assumint alguns dels errors de Mariotte i Bernoulli sobre la posició de la fibra neutra en peces prismàtiques a flexió,

ben aviat va rectificar, incorporant la hipòtesi de deformació plana de la secció transversal que avui dia anomenen *Hipotesi de Navier*. Mes tard aplicaria les seves teories a la determinació, correcta, de les carregues últimes de bigues elàstiques a flexió, determinació de la equació de la línia elàstica, i estudis de plaques a flexió. Navier fou, ben presumiblement^{40, 41}, dels primers a proposar una metodologia de resolució general de problemes hiperestàtics, incorporant els desplaçaments com a ingredients addicionals en la resolució de problemes estàticament indeterminats. Va aplicar aquesta metodologia a resoldre nombrosos problemes d'anàlisi estructural i, en particular, a una tipologia que el va fer conegut arreu: *els ponts penjats*.

PONCELET

Jean Victor Poncelet (1788-1867) fou un altre il·lustre alumne (primer) i professor (després) de l'École Polytechnique de la que en fou el *comandant* (director) durant el període 1848-1850.



Jean Victor Poncelet

Si s'hagués de triar la contribució més significativa de Poncelet a l'anàlisi estructural, aquesta hauria de ser el seu treball sobre la determinació de les propietats mecàniques i resistents dels materials i la seva rellevància en el disseny de les estructures. Fou l'introduïdor dels diagrames tensió-deformació dels materials com una eina per a caracteritzar el seu comportament elàstic i del coeficient de seguretat en les tensions admissibles del material per a tenir en compte les accions dinàmiques.

CAUCHY

Com ja s'ha dit mes amunt* Agustin Louis Cauchy era essencialment un matemàtic...però fou precisament la seva inserció a l'École Polytechnique la que el va portar a la vessant aplicada de molts dels seu desenvolupaments.

196. SUR LES ÉQUATIONS QUI EXPRIMENT
l'état représenté, en conséquence, par les quantités.

$$(1) \quad \begin{cases} A, & F, & E, \\ F, & D, & D, \\ E, & D, & C. \end{cases}$$

Soient d'ailleurs φ la force accélératrice qui sollicite la particule m ,
et X, Y, Z
les projections algébriques de cette force accélératrice sur les axes des
 x, y, z . En prenant x, y, z pour variables indépendantes, on aura,
comme on l'a prouvé à la page 111 du Volume II (*),

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial E}{\partial z} + \rho X = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial z} + \rho Y = 0, \\ \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z} + \rho Z = 0. \end{cases}$$

Figura 29: Un dels primers treballs de Cauchy⁷ mostrant les equacions que porten el seu nom.

Fou un treball preliminar de Navier, presentat a l'Acadèmia de Ciències, sobre la Teoria de la Elasticitat, el que el va atreure al veure-hi les possibilitats que li oferien els seus coneixements matemàtics en la disciplina que s'encetava. Partint de la *teoria de*

* Vegeu la pàgina 35.

les forces moleculars, preconitzades en els treballs previs de Navier i Poisson, desenvolupa per primera vegada el concepte de tensió, a partir del concepte de pressió que ja li era familiar pels seus treball previs en hidrodinàmica⁴⁰. Implícitament postula el caràcter tensorial (independent del sistema de coordenades) de la nova magnitud, i sorgeix la aportació fonamental de Cauchy a la Mecànica de Medis Continus: el *Tensor de Tensions de Cauchy*.

Rescriu les equacions d'equilibri de medis elàstics, que ja havien estat proposades en el context de les teories de les forces moleculars, ara en funció de les components del tensor de tensions, arribant a les que avui dia son conegudes com a equacions de Cauchy (vegeu la Figura 29). Les aportacions posteriors de Cauchy a la Teoria de la Elasticitat son molt nombroses: reformulació del concepte de deformació (infinitesimal) generalitzant-lo com a un tensor simètric en la notació dels nostres dies, interpretació de les seves components com a estiraments unitaris i distorsions angulars⁴⁰, obtenció de les relacions entre tensions i deformacions per a un medi elàstic isotropic*, solucions de la Teoria de la Elasticitat per a diversos problemes de l'anàlisi estructural...i un llarg etcètera.

LAMÉ

Gabriel Lamé (1795-1870) es el prototipus d'enginyer sorgit de l'École Polytechnique; d'esperit universal va treballar durant molts anys a Rússia, en el desenvolupament de la nova xarxa ferroviària i de comunicacions que estava endegant el govern d'aquell país.

* les anomenades equacions constitutives d'un medi elàstic

Va contribuir, com a enginyer-professor, a la fundació de l'activa l'Escola d'Enginyeria de Sant Petersburg, com una rèplica de l'École Polytechnique de la que provenia, i de la que en fou professor de física al seu retorn a París.



Gabriel Lamé

No son d'estranyar, doncs, les nombroses incursions i contribucions de Lamé en l'anàlisi estructural. En particular, es molt conegut el seu llibre²⁶ *Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Elasticité des Corps Solides*.

Entre moltes altres aportacions a la Teoria de la Elasticitat hi trobem les anomenades *constants de Lamé*, que caracteritzen els propietats mecàniques d'un material elàstic lineal isotrop, l'anomenat *el·lipsoid de tensions de Lamé*, figura geomètrica que caracteritza l'estat tensional en un punt del medi elàstic. A nivell de la enginyeria estructural son molt reconegudes les seves contribucions al càlcul i disseny de ponts, així com, també, el disseny de màquines d'assaig per a avaluar les propietats mecàniques dels materials. Fou també l'autor de nombroses contribucions en altres especialitats de la mecànica i de la física.

SAINT-VENANT

Ja s'ha parlat de Adhémar Barré de Saint-Venant* i de la seva excepcional personalitat. Fou un home d'activitat multidisciplinària i va realitzar recerca en diverses branques de la enginyeria, com es ara la enginyeria hidràulica; però,

* vegeu la pàgina 42.

essencialment, es conegut per les seves contribucions a la Teoria de la Elasticitat i l'anàlisi estructural.

616

STATIQUE.

VINGT ET UNIÈME LEÇON.

Mécanique moléculaire. — Élasticité des corps solides. — Pressions ou tensions liquides. — Leurs relations entre elles et avec les forces accélératrices. — Dilatations et déplacements dans les corps. — Leurs relations pour les divers corps (*).

253. *Actions moléculaires. Pressions.* — L'élasticité des corps solides et même des fluides, ou leur retour à leur premier état après des compressions, extensions ou déformations, leurs résistances diverses, leurs vibrations, la transmission en un lieu de l'espace, par leur intermédiaire, des efforts et des ébranlements exercés ou excités dans un autre lieu, et, on peut le dire, toutes leurs propriétés mécaniques, prouvent que les molécules ou les dernières particules qui les composent exercent les unes

(*) Nous devons la rédaction de cette Leçon et de la suivante à M. de Saint-Venant. Il en a puisé la matière non-seulement aux deuxièmes, troisièmes et quatrième années (1817-1819) des *Exercices de Mathématiques*, mais encore dans les autres ouvrages de notre illustre maître, et aussi dans des Mémoires qui ont eu surtout ses travaux pour point de départ, qu'il a approuvés, ou dont les résultats sont une conséquence naturelle des principes posés par lui.

Ces Leçons comprennent la statique de l'élasticité dans ce qu'elle a de plus général. Nous ne rapportons que les applications que Cauchy en a faites (Exercices, troisième et quatrième années) à la flexion de la flexion, et surtout à celle de la torsion, pour laquelle il a ouvert une voie nouvelle, parce qu'il a adopté (Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, du février 1827, t. XXXVIII, p. 319) une autre manière de les traiter, due à M. de Saint-Venant, et qui donne des résultats sensiblement différents, confirmés par diverses expériences, ainsi que par des recherches analytiques entreprises par M. Kirchhoff, ancien professeur de Heidelberg (Ueber die Gleichgewichte und Bewegung eines elastischen Stabes, t. LXI, du Journal de Gröbe, p. 373).

Figura 30: Primera pàgina d'un treball de Saint Venant sobre la Teoria de la Elasticitat en un llibre de mecànica.

El famós *principi de Saint Venant*, que permet substituir les forces superficials sobre un medi elàstic, pel seu equivalent estàtic, es l'ingredient fonamental pel concepte d'esforç (o de tensió generalitzada) com a element fonamental de l'anàlisi estructural dels nostres dies. També es de Saint-Venant l'anomenat *mètode semi-invers*, per a resoldre problemes elàstics^{*}. Aquest mètode li va permetre resoldre el problema general de la torsió de peces prismàtiques, en el que avui s'anomena problema de *Torsió de Saint-Venant*.

A més, les primeres incursions en l'anàlisi del comportament estructural més enllà del règim elàstic, també es deuen als treballs de Saint-Venant sobre la Plasticitat, duts a terme als darreres anys de la seva vida.

Saint-Venant no va ser un escriptor prolífic, ni va escriure, com alguns dels seus coetanis, un llibre específic sobre les seves investigacions. Malgrat això, molts dels seus resultats i mètodes van tenir un impacte molt important en el desenvolupament de l'anàlisi estructural. Una gran part de la seves aportacions es troben en la seva edició del llibre de Navier³⁰ sobre Resistència de Materials, on les seves notes al marge constitueixen més del 90% del total⁴⁰.

CLAPEYRON

Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864) es considerat com un dels fundadors de la ciència de la termodinàmica. Tot i això, i en l'esperit de la recerca multidisciplinària que

^{*} El mètode consisteix en suposar parcialment coneguda la solució del problema en termes dels desplaçaments o les tensions, i resoldre un problema matemàticament simplificat.

caracteritzava els enginyers sortits de l'École Polytechnique, va contribuir a molts avenços en l'àmbit de l'anàlisi estructural.

Com Lamé, després d'acabar els seus estudis a França, va desenvolupar una activitat professional molt destacada a Rússia, exercint com a professor de l'Escola de Sant Petersburg, i amb ell va escriure el conegut treball *Sur l'équilibre intérieur des corps solides homogènes*, molt reconegut per les seves aplicacions pràctiques de la Teoria de la Elasticitat.



Aportacions molt específiques de Clapeyron a l'anàlisi estructural són els procediments de càlcul de bigues contínues i l'anomenat *Teorema de Clapeyron* sobre la energia elàstica de les estructures.

Quan va tornar a França, Clapeyron s'involucrà en el desenvolupament de les noves màquines de vapor i en la construcció de la xarxa ferroviària francesa, així com en exercir la docència en diverses institucions del país.

Fins aquí, doncs, aquest recorregut pels desenvolupaments de l'anàlisi estructural durant els primers anys de l'École Polytechnique, que es sintetitza en la Taula 6. Les fites essencials aconseguides durant aquest període són les següents:

- Es consolida la teoria de bigues a flexió i s'estén a peces prismàtiques de directriu corba i a peces hiperestàtiques³¹.

NOM	DATES	OBRES MES RELLEVANTS SOBRE MECÀNICA ESTRUCTURAL	APORTACIONS A L'ANÀLISI ESTRUCTURAL
Siméon Denis POISSON	1781-1840	Traité de Mécanique (1811) - Mémoire sur les surfaces élastiques (1814) - Mémoires sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques (1828)	Formalització de la mecànica analítica de Lagrange - Teoria molecular de les equacions d'equilibri d'un cos elàstic - Efecte de contracció lateral en medis elàstics (efecte Poisson) - Equació diferencial de plaques elàstiques primes - Vibracions elàstiques
Louis Marie Henri NAVIER	1785-1836	Edició de <i>La Science des ingénieurs de Belidor</i> (1813) - Mémoire sur la flexion des plans élastiques (1820) - Sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques (1821) - Rapport et memoire sur les ponts suspendus (1823) - Résumé des leçons de mécanique (1826) - Sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques (1827)	Teoria molecular de les equacions de moviment d'un cos elàstic - Teoria d'equilibri molecular de les partícules - Resolució de problema hiperestàtics - Equació diferencial de la elàstica - Determinació de càrregues últimes elàstiques - Mètodes de càlcul d'arcs, plaques i làmines.
Jean Victor PONCELET	1788-1867	Cours de mécanique appliqué (1826)	Avaluació de les propietats mecàniques dels materials - Diagrames de tracció/deformació - Resistència dinàmica dels materials
Augustin Louis CAUCHY	1789-1857	Sur les dilatations, les condensations et les rotations produites par un changement de forme dans un système de points matériels - Obres completes (1811-1857)	Introducció dels conceptes de tensió i deformació - Equacions d'equilibri intern d'un medi elàstic - Equacions constitutives d'un material elàstic isotròpic - Resolució del problema elàstic - Gènesi de la torsió en peces no circulars.
Gabriel LAMÉ	1795-1870	Cours de physique à l'école Polytechnique (1836)-Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides (1852)	Experiments sobre el comportament elàstic de materials - Elipsoide de tensions (<i>Ellipsoide de Lamé</i>) - Determinació de les propietats elàstiques dels materials
Adhémar BARRE de SAINT-VENANT	1797-1886	De la torsion des prismes (1853) - Edició de Résumé des leçons de mécanique de Navier (1864)	Teoria general de la torsió (Torsió de Saint-Venant) - Teoria de la elasticitat - Mètode semi-invers per a problemes elàstics - Estudis inicials sobre la plasticitat
Emile CLAPEYRON	1799-1864	Sur l'équilibre interieur des corps solides homogènes (1828)	Estudi de l'equilibri de sòlids homogenis - Mètode de càlcul de bigues contínues- Teoremes energètics (<i>Teorema de Clapeyron</i>)

Taula 6: Evolució cronològica de l'anàlisi estructural durant els primers anys de l'École Polytechnique: de Poisson a Clapeyron

- ➔ Es formulen mètodes de càlcul per a estructures complexes: ponts penjats ³¹, bigues contínues (Clapeyron), plaques (Poisson, Cauchy), làmines ³¹ etc.
- ➔ Es generalitzen les teories de torsió simplificades (exclusives per a peces cilíndriques) a peces prismàtiques de qualsevol secció (Cauchy, Saint-Venant).
- ➔ Partint de la teoria de les forces moleculars (Poisson, Navier, Cauchy) s'arriba a una primera versió de les equacions de equilibri del medi elàstic.
- ➔ Es formula, en gairebé la seva totalitat, la *Teoria de la Elasticitat* isotròpica que utilitzem actualment. Cauchy introdueix el concepte revolucionari de tensió i formalitza el de deformació. Amb ells, formula la nova versió de les equacions d'equilibri intern i d'equilibri en el contorn arribant al plantejament general del problema elàstic.
- ➔ Les equacions de Cauchy són resoltes per un ampli ventall d'estructures (bigues, plaques, làmines etc.) proporcionant-ne una solució exacte (Cauchy, Lamé, Saint-Venant, Clapeyron). S'inicien els estudis d'efectes dinàmics (Poisson, Cauchy).
- ➔ S'avaluen, experimentalment, les propietats elàstiques dels materials estructurals més comuns (Poncelet, Lamé).
- ➔ Les noves teories i mètodes d'anàlisi estructural es publiquen, primer, com a comunicacions a l'Acadèmia de Ciències però també, en forma compacta, com a apunts i notes dels cursos regulars que s'imparteixen a l'École Polytechnique. Aquests apunts són posteriorment editats en forma de llibres i disseminats per a tot el món.

Ens trobem doncs que un període de temps molt curt, l'acció, directa, de l'École Polytechnique va transformar unes pràctiques rudimentàries en les bases de la disciplina científica que avui anomenem la *Mecànica de Medis Continus i Teoria*

d'Estructures. Així fonamentada, la enginyeria estructural va poder desenvolupar-se ràpidament, i proporcionar propostes i respostes a les demandes de noves construccions, i de nous materials requerides per l'espectacular creixement tecnològic dels segles XIXé i XXè. Només l'adveniment l'ordinador digital, en el darrer terç del segle passat, va requerir un revisió d'aquelles bases teòriques per adequar-les als anomenats *mètodes numèrics d'anàlisi estructural*³².

De ben segur que seria injust ignorar les contribucions a aquesta disciplina científica d'altres coetanis dels que hem citat; noms que es poden trobar a les clàssiques recopilacions històriques^{40, 41}. Però no es pot discutir que la part més important, i determinant, dels desenvolupaments de l'anàlisi estructural es feu, gairebé de forma total, a l'École Polytechnique durant els primers anys de la seva història.

Es aquest, doncs, un paradigma dels efectes que la institució de l'École Polytechnique va tenir en el desenvolupament i creixement científic d'una branca de l'enginyeria: l'enginyeria estructural.

I aquest només n'és un exemple; la enginyeria civil, en general, la enginyeria mecànica, la enginyeria de materials, la enginyeria química, la enginyeria elèctrica, la enginyeria cartogràfica ... i tantes altres branques de la enginyeria, troben moltes de les arrels històriques del seu desenvolupament científic en la primitiva École Polytechnique.

Certament, fou la conjunció, en una mateixa institució, del desenvolupament i l'ensenyament de ciències fonamentals (les matemàtiques, la mecànica, la física, la geometria) i la formació orientada vers l'enginyeria, el que va propiciar aquest desenvolupament explosiu.

V. -CLOENDA

A l'École Polytechnique Ciència i Enginyeria van estar íntimament connectades. Allà fou on el coneixement i l'estudi de les ciències bàsiques foren considerats, per primera vegada, com una part fonamental de la educació dels enginyers. El resultat va ser una època d'avenços transcendents en la Enginyeria, ara ja una Ciència en sí mateixa.

La fama de l'École Polytechnique es va estendre ràpidament i el seu exemple fou àmpliament imitat arreu del món: naixeren les Escoles o Instituts Politècnics de Viena, Zuric, Sant Petersburg, Lausanne, Milà etc., que són només exemples d'un esclat que va multiplicar i expandir, durant tot el segle XIX, l'esperit original de l'École Polytechnique.

La estructuració de l'ensenyament de l'enginyeria europea continental, en uns cursos bàsics, dedicats a l'estudi intens de les ciències fonamentals, i uns cursos posteriors dedicats a l'estudi específic de cada branca de l'Enginyeria ha estat una herència d'aquells tems que ha arribat fins els nostres dies. No ha sigut fins ara mateix que aquest paradigma s'ha qüestionat; amb una tendència a modificar-lo envers un model d'ensenyament de inspiració anglosaxona a on, tradicionalment, l'ensenyament de les ciències fonamentals a la enginyeria ha estat més secundari... i tant de bo que sigui a fi de bé!

En qualsevol cas la empremta de l'École Polytechnique ja es indeleble. La Ciència es avui present a l'Enginyeria i l'Enginyeria també ha esdevingut una Ciència. Aquest treball han volgut ser un homenatge a l'esperit original d'aquella institució i d'aquells dels seus membres que ho van fer possible. En ells hi hem pogut trobar virtuts com la constància, l'esforç, la valentia, la intel·ligència, la fidelitat a uns principis...i també, naturalment, defectes de la condició humana. Però en tots ells, en tots, hi trobem uns elements

comuns: la passió per saber i per donar a conèixer, la passió per aprendre i per descobrir...la passió per la Ciència.

....aquest es el seu llegat.

REFERENCES

- [1] Biography in Dictionary of Scientific Biography, 1970-1990, Ed. New York, 1970-1990.
- [2] *Ballarini R.* The Da Vinci- Euler Bernoulli beam theory ? vol. 206: ASME, American Society of Mechanical Engineers, 2003.<http://www.memagazine.org/contents/current/webonly/webex418.html>
- [3] *Barré de Saint-Venant A.* De la torsion des prismes: avec des considérations sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre des solides élastiques en général et des formules pratiques pour le calcul de leur résistance à divers efforts s'exerçant simultanément [Document électronique]. BnF/Gallica, 1995.<http://gallica.bnf.fr/>
- [4] Bennett J.,Cooper M.,Hunter M.,Jardine L. *London's Leonardo: The Life and Work of Robert Hooke*. Oxford University Press, 2004.
- [5] Bernoulli J., Véritable hypothèse de la résistance des solides, avec la démonstration de la courbure des corps qui font ressort, in *Académie royale des sciences*. Paris, 1705.
- [6] Callot J.P. *Historie de l'École Polytechnique*. Paris: Les Presses modernes, 1958.
- [7] *Cauchy A.L.* Sur les équations qui expriment les conditions d'équilibre ou les lois du mouvement intérieur d'un corps solide, élastique ou non élastique. in *Oeuvres complètes d'Augustin Cauchy* [Document électronique]. BnF/Gallica, 1995.<http://gallica.bnf.fr/>
- [8] *Cauchy A.-L.* *Oeuvres complètes d'Augustin Cauchy* [Document électronique]. BnF/Gallica, 1995.<http://gallica.bnf.fr/>
- [9] Chapman A. England's Leonardo: Robert Hooke (1635-1703) and the art of experiment in Restoration England. *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*. 67, 239 - 275, 1996.
- [10] Coulomb C.A., Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de metal, in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*. Paris, pp. 229-269.
- [11] *Coulomb C.A.* Recherches teoriques et experimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de metal. in *Memoires de l'académie royal des Sciences. Collection de mémoires relatifs a la physique. Tome I. Mémoires de Coulomb*. vol. 2006, Gauthier-Villars ed. Paris: Le Conservatoire numérique des Arts & Métiers, 1785.<http://cnum.cnam.fr/>
- [12] Davies B. Edme Mariotte 1620-1684. *Physics Education*. 9, 275-278, 1974.
- [13] Dhombres J. *L'École polytechnique e ses historiens* (preface a l'*Histoire de l'École Polytechnique de A. Fourcy*). Paris: Belin, 1987.
- [14] *École de Ponts et Chaussées*. web page (Historique). 2005.http://www.enpc.fr/fr/enpc/histoire/histoire_ecole.htm
- [15] *École des Mines*. web page. 2005.<http://www.ensmp.fr/Fr/ENSMP/Histoire/histoire.html>
- [16] *École Polytechnique de Paris*. web page. 2005.<http://www.polytechnique.fr/institution/historique.php>
- [17] *Euler L.* Solutio problematis de inveniendi curva, quam format lamina utcunque elastica in singulis punctis a potentiis quibuscunque sollicitata. T. E. Archive, Ed., 1732.<http://www.eulerarchive.org/>
- [18] Fourcy A. *Histoire de l'École Polytechnique*. Paris: Belin, 1987.
- [19] Gens A. *Geotecnia: una ciencia para el comportamiento del terreno*. Reial Academia de Doctors, 2005.
- [20] Gillmor C.S. *Charles Augustin Coulomb : Physics and Engineering in Eighteenth Century France*. Princeton, N.J., 1971.

- [21] Grattan-Guinness I., *The Ecole Polytechnique, 1794-1840s: Policies, Polemics, Publications*, To appear in F. Rickey and A. shell (eds). 2005.
- [22] *Grup d'Estudis Astronòmics (AstroGea)*. Jean François Dominique Arago. 2005.<http://www.astrogea.org/asteroides/varis/arago/>
- [23] Hooke R. *Micrographia, or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries thereupon*. London, 1665.
- [24] Hooke R. *A description of Helioscopes and some other Instruments*. London, 1676.
- [25] Hooke R. *Lectures de potentia restitutiva, or, Of spring : explaining the power of springing bodies*. London: printed for John Martyn, 1678.
- [26] Lamé G. *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*. Paris: Bachelier, 1852.
- [27] Lienhard J.H. Engines of our Ingenuity: No 223. Sophie Germain. 1998.<http://www.uh.edu/engines/epi223.htm>
- [28] Lienhard J.H. The Polytechnic Legacy. in *ASME Management Training Workshop*. Sheraton Dallas Brookholow hotel, Dallas, TX, USA, 1998.<http://www.uh.edu/engines/asmedall.htm>
- [29] Mariotte E. *Ouvres de Mr. Mariotte*. A. Leide Chez Pierre Vander Aa., 1717.
- [30] Navier C.L.M.H. *Résumé des leçons données à l'École des Ponts et Chaussées*. Paris: Carilian-Goeury, 1833.
- [31] Navier L.H. Mémoire sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques. in *Memoires de l'Académie des Sciences de Paris*. Bibliothèque National de France, 1821.http://www.academie-sciences.fr/archives/histoire_memoire.htm
- [32] Oñate E. *El aura de los números*. Reial Academia de Doctors, 1998.
- [33] Parent A. *Recherches de physique et de mathématiques*. 2. Paris,, 1705.
- [34] Poisson S.D. *Traité de Mécanique*. Paris, 1811.
- [35] Saouma V. *Lecture notes in Structural Engineering: Analysys and Design*. Boulder, Co, USA: Dept. of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Colorado at Boulder.
- [36] Shinn J. *l'École Polytechnique 1794-1914*. Presses de la fondation nationale de sciences politiques, 1980.
- [37] Tavernor R. Palladio's Four Books on Architecture. *ArchitectureWeek*, pC1.1, 2000.
- [38] *The MacTutor History of Mathematics archive*. 2005.<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/index.html>
- [39] *The San Diego Supercomputer Center*. Women in Science. 2005.<http://www.sdsc.edu/ScienceWomen/>
- [40] Timoshenko S.P. *History of Strength of Materials*. New York, USA: Dover Publications Inc., 1983.
- [41] Todhunter I. *A history of the theory of elasticity and of the strngth of materials*. New York, (USA): Dover Publicatons Inc., 1960.
- [42] Torroja E. *Razon y ser de los tipos estructurales*. 7ª ed. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", 1991.
- [43] *Wikipedia*. The free encyclopedia. 2006.<http://en.wikipedia.org/wiki/Engineering#Etymology>
- [44] Zwerling C. *The emergence of the École Normale Supérieure in the organization of science and technology in France, 1808-1914*. Maison des Sciences de l'Homme, 1980.

ANNEX 1:

DEMOSTRACIO DE LA LLEI DE LA PALANCA (EQUILIBRI DE MOMENTS) EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO

SAGREDO : mentre Simplicio i jo us esperàvem estàvem recordant la darrera consideració que vàreu establir com a principi y base pels resultats que intentàveu demostrar. Aquesta consideració tractava sobre la resistència que els sòlids oferien a la fractura que depenia de un cert ciment que mantenia unida les dues parts, de manera que elles només es podien separar sota una considerable tracció (potente attrazione). Mes tard intentàreu trobar un explicació a aquesta coherència en la quantitat de buit existent , lo que ens portà a moltes digressions que ens prengueren tot el dia i ens menaren lluny de la qüestió original que jo vaig fer, que era la resistència dels sòlids a la fractura

SALVIATI: Ho recordo molt bé. Reprenent el fil del nostre discurs, qualsevulla que sigui la naturalesa d'aquesta resistència que els sòlids ofereixen a grans forces de tracció, no hi pot haver cap dubte de la seva existència; i tot i que aquesta resistència es molt forta en el cas de un estirament (tracció) directe, es troba com a regla que es menor en el cas de accions transversals (flexió). Per exemple, una barra de ferro o de vidre sostindrà un estirament horitzontal de mil lliures, mentre un pes de cinquanta lliures serà suficient per a trencar-la si la barra està convenientment subjecte en angle recte entre dues

parets verticals. Es aquest segon tipus de resistència la que hem de considerar, cercant descobrir en quina proporció es troba en cilindres i prismes del mateix material, ja siguin semblants o no en forma, llargària i dimensions. En aquesta discussió prendré com a cert el ben conegut principi mecànic que ha mostrat governar el comportament d'una barra, que anomenem palanca, que diu que la força que carrega es a la resistència que fa, de manera inversament proporcional a la raó de les distàncies del fulcre (suport) a la força i a la resistència, respectivament.

(aquí Galileo formula la coneguda llei de la palanca) i segueix recordant el seu origen:

SIMPLICIO: Això va ser demostrat per Aristòteles en la seva Mecànica..

SALVATI: Sí, i m'agradaria concedir-li prioritat en quan al temps: però en el que es refereix al rigor de la demostració el lloc s'ha de donar a Arquímedes, ja que de una proposició en el seu llibre sobre l'equilibri^{} sorgeix no solament la llei de la palanca sinó també de molts altres aparells mecànics.*

SIMPLICIO: Ja que això es fonamental en totes les demostracions que us proposeu fer, ¿no seria recomanable donar-nos-en una prova completa si es que no prengué massa temps?

SALVATI: Sí, seria apropiat, però penso que es millor apropar-nos al nostre tema d'una manera que es una mica diferent de la emprada per Arquímedes, per exemple, suposant que pesos iguals posats en una balança de braços iguals produiran equilibri, un principi

^{*} Works of Archimedes. Trans. by T.L. Heath, pp. 189-220

també acceptat per Arquímedes, i després provar que no es menys cert que pesos desiguals produeixen equilibri quan els braços de la romana* tenen llargàries inversament proporcionals als pesos suspesos d'ells: en altres paraules, conta el mateix si hom posa pesos iguals a iguals distàncies o pesos desiguals a distàncies que estan en relació, una amb l'altra, inversa a la dels pesos.

Per fer això més clar, imagineu un prisma o un cilindre sòlid, AB, suspès a cada extrem de la barra (HI), sustentat pels dos fils HA i IB. Es evident que si jo lligo un fil, C, en el punt mig de la balança HI, tot el prisma AB, d'acord amb el principi suposat, penjarà en equilibri ja que una meitat resta a un costat i l'altra meitat a l'altre costat del punt de suspensió C.

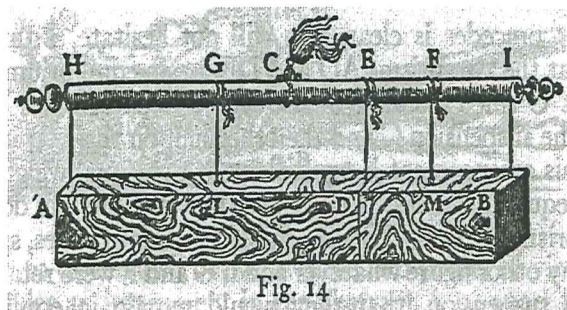


Fig. 14

Ara suposem el prisma dividit en parts desiguals per un pla a través de la línia D, de manera que la part DA sigui més gran que la més petita DB. Un cop feta aquesta divisió, imagineu el fil ED, lligat al punt E i

* balança

sostenint les parts AD i DB de manera que aquestes parts es mantinguin en la mateixa posició relativa a la línia HI. Ja que la posició relativa del prisma i la biga HI romanen sense canvis, no hi ha cap dubte de que el prisma mantindrà el primitiu estat d'equilibri. Però les circumstàncies romandrien sense canvis si aquella part del prisma que ara està sostinguda, en els extrems, pels fils AH i DE fos suspesa al centre per un únic fil GL: i de la mateixa manera l'altra part DB no canviaria de posició si estés mantinguda per un fil FM situat al seu punt mig. Suposem ara que retirem els fils HA, ED i IB deixant només els dos fils GL i FM, aleshores el mateix equilibri quan la suspensió es al punt C. Ara considerem que tenim dos cossos pesats AD i DB penjant al extrems G i F, d'una balança GF en equilibri al voltant del punt C, de manera que la distància CG és la distància de C al punt de suspensió del cos pesat AD, mentre que CF és la distància a la qual l'altra cos pesant està recolzat. Només queda per demostrar que aquestes distàncies són una respecte de l'altra en proporció inversa de propis pesos, es a dir, la distància GC es a la distància CF com el prisma DB es al prisma DA. Una proposició que jo provaré com segueix: com que la línia GE és la meitat de EH, y com que EF és la meitat de EI, la llargària total GF serà la meitat de tota la línia HI i, per tant, igual a CI. Si ara restem la part comú CF, la part restant GC serà igual a la part restant FI, es a dir a FE, i si a cada una d'aquestes parts li afegim CE tindrem GE igual a CF. Per tant $GE:EF=FC:CG$. Però GE i EF està en raó una a l'altra com el seus dobles HE i EI, es a dir, la mateixa raó que el prisma AD a DB. Per tant, igualant les raons tenim, "convertendo", que la distància GC es a la distància CF com el pes BD es al pes DA, que es el que volia demostrar.

Si el que precedeix està clar, no dubtareu, crec, en admetre que els dos prismes AD i DB estan en equilibri al voltant del punt C, ja que una meitat de tot el cos AB rau a la dreta del punt de suspensió i l'altra meitat a l'esquerra. En altres paraules, aquesta situació es igual a dos pesos iguals disposats a distàncies iguals. Jo no veig com es pot dubtar que si els prismes AD i DB es transformen en cubs i esferes, o en qualsevol altra figura i si G i F es mantinguessin com a punts en suspensió romandrien en equilibri al voltant del punt C, ja que es tan evident que el canvi de figures no produeix canvi de pes mentre la quantitat de matèria no variï. A partir d'això, poden derivar la conclusió general de que dos cossos pesats estan en equilibri a distàncies que son inversament proporcionals als seus pesos.*

* matèria ha de ser entès aquí com a massa

ANNEX 2:

SOBRE LA RESISTENCIA DE PEÇES SOTMESES A TRACCIÓ EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO

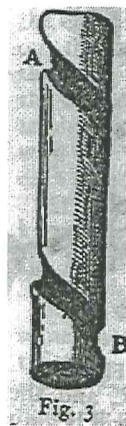
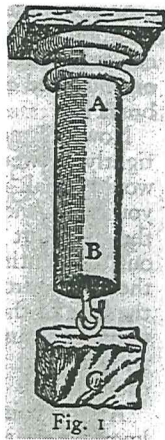
SALVIATI :.... per entendre-ho més clarament imaginem-nos un cilindre AB fet de fusta o una altre sòlid semblant. Lliguem l'extrem superior A de tal manera que el cilindre pengi verticalment. A l'extrem inferior B hi lliguem un pes C. Es clar que, per gran que siguin la tenacitat i coherència entre les dues parts, ja que no son infinites poden ésser superades per l'estirament del pes C, un pes que pot ésser incrementat indefinidament fins que el sòlid es trenca com una corda. I, com en el cas d'una corda, de la qual coneixem la resistència derivada de la multitud de filaments de cànem que la componen, en al cas de la fusta observem que els seus filaments i fibres la recorren en tota la seva llargària i la tornen molt mes resistent que una corda del mateix gruix. Però en el cas d'un cilindre metàl·lic o d'una pedra, en els que la coherència sembla encara mes gran, el ciment que manté juntes les parts, es quelcom mes que filaments i fibres; i malgrat això també pot ésser trencat mitjançant una forta estirada.*

SIMPLICIO: Però si això es com vos dieu jo puc entendre bé que les fibres de la fusta, essent tan llargues com la pròpia peça de fusta, la tornen tan resistent contra grans forces que volen trencar-la.

* coherència ha de ser entès aquí com a resistència

Però ¿com pot ser que una corda de cent colzes de llarg, feta de fibres de cànem que no son mes llargues que dos o tres colzes, tingui tanta resistència? A més, m'agradaria sentir la vostra opinió sobre la manera que les peces de metall o de pedra y d'altres material que no mostren una estructura filamentosa es mantenen juntes i, raó per la que, si no m'equivoco, exhibeixen una tenacitat tan gran.

SALVIATI : Per a resoldre els problemes que em plantejges serà necessari fer una digressió en temes que tenen poc a veure amb al nostre propòsit actual...



ANNEX 3:

SOBRE LA RESISTENCIA DE PEÇES SPTMESES A FLEXIO I RESISTENCIA DE MENSULES EN EL DIALEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEO

SALVIATI :.... tornem ara al nostre tema original. Si el que fins ara s'ha dit esta clar es podrà entendre fàcilment la següent

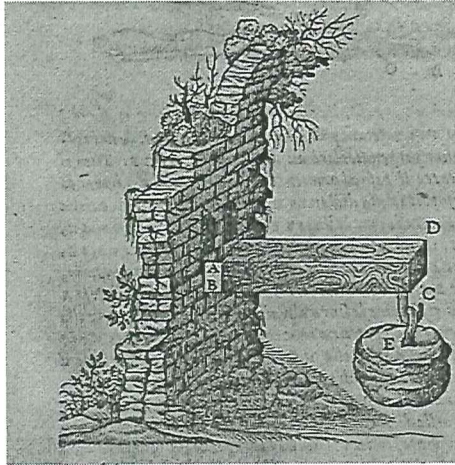
Proposició I:

Un prisma o cilindre sòlid de fusta o de vidre o d'un altre material trencable, si bé es capaç de sostenir un pes molt pesant quan se li aplica longitudinalment, com s'ha assenyalat anteriorment, es pot trencar fàcilment per l'aplicació d'una força transversal d'un pes que pot ser molt mes petit quan la llargada del cilindre excedeix en molt el seu gruix.

Imaginem el prisma sòlid ABCD subjecte a la paret al seu extrem AB, i sostenint un pes E al seu altre extrem. Suposem també que la paret es vertical que el prisma o cilindre forma un angle recte amb la paret. Es clar que, si el cilindre es trenca, la fractura ocorrerà al punt B on la vora de la paret actua com un fulcre per la palanca BC, a la que la força es aplicada.

El gruix del sòlid BA es l'altre braç de la palanca sobre la que hi actua la resistència. Aquesta resistència s'oposa a la separació de la part BD de la part d'enfora de la paret respecta a la part a dins de la mateixa. D'això se'n desprèn que la magnitud de la

resistència* a la força aplicada a C es suportada per la magnitud de la resistència que troba en el gruix del prisma, es a dir, a la unió de la base BA a la seva part contiguous (dins de la paret) en la mateixa proporció de la llargada CB respecte a la meitat de la distancia BA.



Si ara definim la resistència absoluta a la fractura, com aquella que s'ofereix a un estirament longitudinal (en la que la força d'estirament actúa en la mateixa direcció en la que es mou el cos) aleshores la absoluta resistència del prisma BD i la força de trencament al final de la palanca BC estan en la mateixa proporció que la llargada BC i la meitat de AB, en el cas del prisma, o el semi-diàmetre en el cas del cilindre. Aquesta es la nostra primera proposició. Observeu

* resistència ha de ser entès aquí com a moment

que, en el que s'ha dit fins ara, el pes del sòlid BD s'ha deixat fora de consideració o, mes ben dit, que el prisma s'ha suposat sense pes. Però si el pes del prisma ha de ser pres en consideració en conjunció amb el pes E, hem d'afegir al pes E una meitat del pes del prisma: així que si, per exemple, aquest pesa dues lliures i el pes E deu lliures, hem de tractar el pes E com de onze lliures.

SIMPLICI: ¿I perquè no dotze lliures?

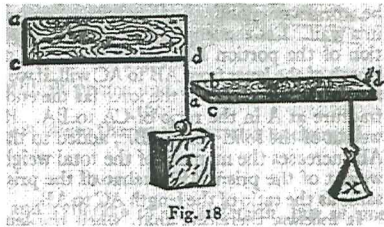
SALVIATI: El pes E, ben volgut Simplicí, que penja de l'extrem C actua sobre la palanca BC amb el seu moment complert de deu lliures; així també ho faria el sòlid BD si estès penjat del mateix punt i exerciria el seu moment complert de dues lliures. Però com sabeu, el (pes del) sòlid està uniformement distribuït al llarg de tota la seva llargada BC, així que les parts que estan mes prop de l'extrem B son menys efectives que aquelles que hi son mes remotes. D'acord amb això, si fem una balança entre els dos, el pes de tot el prisma podria considerar-se al centre de gravetat que està a la meitat de camí de la palanca BC. Però el pes que penja de la extremitat C, exerceix un moment doble que si estès penjat de la meitat. En conseqüència si considerem els moments dels dos com si estiguessin situats a l'extrem C, hem d'afegir al pes E la meitat del pes del prisma.

SIMPLICI: Ho entenc perfectament; i amés, si no m'erro, la força dels dos pesos BD i E disposats d'aquesta manera, exercirien el mateix moment que el pes total BD juntament amb el doble del pes E suspesos a la meitat de la palanca BC.

SALVIATI: Exactament així, i es un fet que s'ha de recordar.....Ara podem entendre fàcilment la següent

Proposició II:

Com i en quina proporció una barra, o mes aviat un prisma, amb una amplada mes gran que el seu gruix ofereix més resistència a la fractura quan una força hi es aplicada en la direcció de la seva amplada o en la direcció del seu gruix. Per raons de claredat considerem un regle ad de qual la amplada es ac i del que el gruix cb es molt menor que l'amplada. La pregunta és ¿perquè el regle, si està dret sobre el seu gruix, com a la primera figura, suporta un gran pes T , mentre que quan jeu pla, com a la segona figura, no suporta el pes X , que es mes petit que T ?

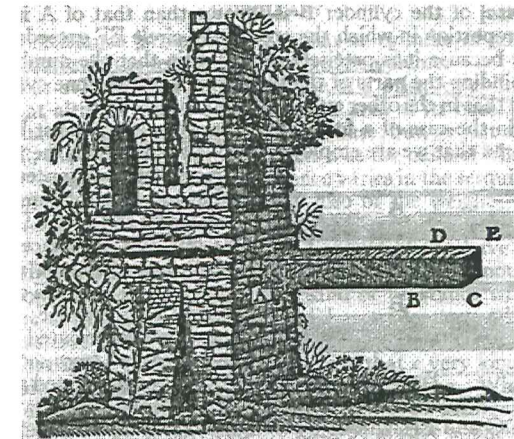


La resposta es evident quan recordem que en un cas el fulcre es a la línia bc , i en l'altre a ca , mentre que la distancia a la que la força s'aplica es la mateixa en ambdós casos, es a dir la distància bd ; però en el primer cas la distància de la resistència al fulcre - la meitat de la línia ca es més gran que en l'altre cas, on es solament la meitat de bc . Per tant, el pes T es mes gran que el pes X en la mateixa proporció que la meitat del ample ca es a la meitat de l'ample bc , ja que el primer actua com una palanca per ca i el darrer per cb , contra la mateixa resistència, es a dir, la

resistència de totes les fibres de la secció transversal ab . Concloem, doncs, que qualsevol regle donat, o prisma, del qual l'ample excedeixi el gruix, oferirà mes gran resistència quan ses sosté sobre la seva vora que quan està pla, i això en la raó de l'amplada al gruix.

Proposició III:

Considerant ara el cas d'un prisma or cilindre que jeu al amb la seva llargària en la posició horitzontal hem de descobrir en quina proporció el moment del seu propi pes augmenta en proporció a la seva resistència a la fractura.



He trobat que aquest moment augmenta en proporció al quadrat de la seva llargada. Per tal de provar-ho, sigui AD un prisma o cilindre que jeu horitzontal amb

els seu extrem A fixat fermament a la paret. Augmentem la llargada del prisma mitjançant la addició de la porció BE. Es clar que, només canviant la llargada de la longitud de la palanca de AB a AC, i si menyspreem el seu pes, s'augmenta el moment de la força (a l'extrem) tendint a produir la fractura a A, en la relació de CA a BA. Però, a més d'això, el pes de la porció de sòlid AB augmenta el moment del pes total en la proporció del pes del prisma AE al del prisma AB, que es la mateixa proporció que les longituds AC a AB. Se'n desprèn, per tant, que quan la llargada i el pes son augmentats simultàniament en qualsevol proporció donada, el moment, que es el producte d'aquests dos, augmenta en una proporció que es el quadrat de la proporció anterior. La conclusió es, aleshores, que els moments flectors, degut al pes dels prismes que tenen el mateix gruix però diferent longituds, estan l'un amb l'altre en una relació que es el quadrat de la raó de les seves longituds o, lo que es el mateix, la raó del quadrats de les seves longituds.