



# REAL ACADEMIA DE DOCTORS

---

## La ciència a l'Enginyeria: El llegat de l'école polytechnique

•

Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari electe

Excm. Sr. Xavier Oliver i Olivella

Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports

A l'acte de la seva recepció, 19 de desembre de 2006, i

discurs de contestació de l'acadèmic de número

Excm. Sr. Josep Pla i Carrera

Doctor en Matemàtiques

Barcelona

2006



Dr. Xavier Oliver i Olivella

La ciència a l'Enginyeria:  
El llegat de l'école polytechnique

REIAL ACADEMIA DE DOCTORS  
-Publicacions-







Excel·lentíssim Senyor Degà-President,  
Excel·lentíssims Senyores i Senyors Acadèmics,  
Senyores i Senyors,

En primer lloc voldria expressar el meu profund agraïment a la Reial Acadèmia de Doctors i als seus acadèmics, que em reben avui com a un dels seus membres; és un gran honor el que em feu i espero saber ser-ne digne.

Aquesta dissertació vol ser, d'una banda, una reivindicació de l'Enginyeria com a Ciència dels nostres dies i, d'una altra, un intent de rememorar el paper cabdal d'una institució, L'École Polytechnique de París, en la introducció de la Ciència a l'àmbit de l'Enginyeria en una època històrica molt concreta: la que va des de la fundació de la institució, a finals del segle 18è, fins a la primera meitat del segle 19è.

Al llarg de la dissertació, explorarem quins foren els orígens, els mètodes de treball i l'evolució de l'enginyeria, des d'èpoques remotes fins a la fundació de l'École Polytechnique. I ho farem enfocant una branca específica: l'enginyeria estructural.

I veurem, també, quins foren els efectes de l'École Polytechnique sobre aquesta branca, i per extensió sobre totes les altres branques de l'enginyeria, transformant-les en noves ciències

mitjançant la incorporació del coneixement d'altres disciplines i dels mètodes i procediments científics.

Recolzant-nos en algunes ressenyes històriques retrobarem l'esperit dels fundadors i dels primers professors i alumnes de l'École Polytechnique, els objectius que pretenien i els ideals que els animaven.

I veurem com, en els pocs anys que considerem, l'École Polytechnique de París fou determinant en una nova manera d'entendre, d'investigar, d'ensenyar i de divulgar l'enginyeria.

... un llegat del que els enginyers d'avui en som els hereus.



## I.- INTRODUCCIÓ

Tot i la creença comuna que el terme *enginyer* prové de *qui fa ginys*, possiblement l'afirmació s'hauria d'invertir: els ginys 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 *hàbil*<sup>4 3</sup>. 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 d'una torre de setge era denominat amb la paraula normanda *engynour*<sup>28</sup>). En aquest sentit la història de l'enginyeria s'estén 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 Siracussa 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 descripció de la campanya de Marcellus, el general que comandava l'exercit Romà:



Arquímedes de Siracusa

*... 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 increïble i contra les quals cap home podia fer-hi res; copejaven a aquells sobre els que queien a dojo, trencant les seves files ...mentrestant, enormes palanques sorgien de les*

*muralls 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 ....*

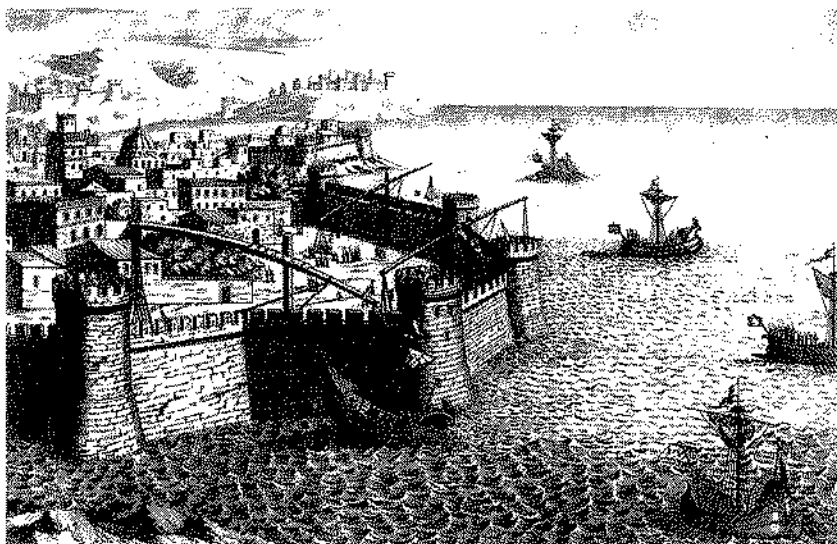


Figura 1: Gravat sobre el setge de Siracussa

Durant molt de temps van ser els militars els únics als que era aplicat el nom d'enginyer. No fou fins a mitjans 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 militars. Per a distingir-los dels anteriors, aquests 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 hagi adjudicat aquest nom, però en el mateix esperit de la definició anterior, podríem considerar, doncs, com d'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 l'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 d'elevació d'aigües...

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

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

Possiblement ningú negaria el caràcter científic de la recerca en l'enginyeria dels nostres dies, ni la qualificació de l'enginyeria com a *ciència, o conjunt de ciències, que genera nous coneixements, en uns àmbits que li són propis i amb una orientació específica vers l'aplicació*. Possiblement ningú negaria, tampoc, que a l'enginyeria de l'actualitat es fa un ús intensiu de ciències més bàsiques o fonamentals: de les matemàtiques, de la física, la química... per a investigar, en la més 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, s'estén fins a l'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 la 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 baixa Edat Mitjana i el Renaixement 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 Galileu (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 l'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 mitjans del segle XVIII començava a haver-hi centres específics per a l'ensenyament de l'enginyeria, com les franceses École de Ponts et Chaussées<sup>14</sup> (fundada al 1747) i l'École des Mines<sup>15</sup> (al 1783), però els procediments d'ensenyament i aprenentatge de l'enginyeria no eren molt diferents dels esmentats més amunt. La ciència i l'enginyeria eren, doncs, més apart.

Fins que un dia, tot va canviar...

## ELS ORÍGENS

*...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 Biot<sup>18</sup>).*

Corria l'any 1794, i en un París tresbalsat pels dies caòtics de la Revolució Francesa, i de l'anomenat Regne del Terror, es

produeix un fet que aleshores podia semblar poc significant: el vint-i-un 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 Públics<sup>6</sup>, i una institució per allotjar-la: l'École Centrale des Travaux Publics, que més tard fou anomenada École Polytechnique.

La Comissió<sup>\*</sup> 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 civils<sup>13</sup>. La idea jacobina d'una reorganització centralitzada dels 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 desdibuixada, si és ben provat que Monge fou un actor important de la primera hora de l'École Polytechnique<sup>†</sup>. També són clars quins eren els objectius concrets que es perseguien<sup>13</sup>:

*... davant de la manca de quadres científics i tècnics i de les necessitats cada vegada més urgents de la Nació, es decideix constituir una Comissió composta pels científics i enginyers més eminents. Aquesta comissió serà l'encarregada d'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 ortodoxos, van ser

---

<sup>\*</sup> Alguns historiadors l'anomenen la *Comissió dels savis*

<sup>†</sup> 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.

encarregats de reformar el sistema d'ensenyament superior francès.



Figura 2: L'École Polytechnique de París

L'École Polytechnique va obrir les seves portes el dia primer del mes Nevòs (21 de Desembre) de 1794<sup>16</sup>. Així doncs, el 21 de Desembre de 1794, esdevé la data fundacional de l'École Polytechnique; però, és més que això... és el començament d'un nou camí, pels enginyers i l'enginyeria, des d'aleshores fins els nostres dies.

## *UNS NOUS ALUMNES....*

L'espectre sociològic dels 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 l'educació i un gran nombre d'estudiants, de totes les classes socials, acudiren a la convocatòria d'un nombre reduït de places, que foren cobertes amb criteris competitiu i basats en els resultats d'exàmens



específics, a través de vint-i-dos centres de reclutament distribuïts per tot el país<sup>18</sup>. 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 Comissió<sup>13</sup>:

*... volem cridar a aquells que ja son, a hores d'ara, els més preparats, per tal que la República pugui fruir aviat de l'exercici dels seus talents. L'única manera de reconèixer-los és 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 renunciacions, per manca de mitjans econòmics, es va becar als estudiants amb un sou que equivalia al d'un artiller de primera classe<sup>16</sup>.

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 I: Dades del nombre de candidats i d'acceptats en les primeres proves de selecció (extretes de la referència<sup>13</sup>).

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), més encara si es considera que molts dels candidats es preparaven durament a les denominades, *écoles préparatoires*, que seleccionaven, al seu torn, els estudiants que deixaven presentar-se a les proves.

Aquestes circumstàncies 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 una elit intel·lectual, curiosament seleccionada, primer, i excepcionalment formada, després, destinada a ocupar llocs preeminents en l'estructura de lideratge social i intel·lectual de la societat revolucionària. La gran diferència respecte al sistema precedent és que l'extracció social no hi tenia, en principi, res a veure.

Défenseurs de la patrie sortant des armées de la République . . . . .	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
	274
II.	
Sans fortune. . . . .	160
Présumés dans l'aisance. . . . .	75
Présumés riches . . . . .	39
	274

Taula 2 : Dades de l'extracció social dels alumnes a l'any 1799 (tret de la referència <sup>36</sup>).

L'extracció social dels alumnes de l'École, és també reveladora de què els principis de selecció no es varen subvertir en els primers anys de vida de la institució. Com es pot comprovar a la Taula 2, dels alumnes del 1979 només 39, sobre 274, (un 15%) eren de famílies riques, mentre que 160 (un 58%) no tenien cap fortuna.

Aquest fou l'esperit inicial de la institució, del que n'és un paradigma l'argument donat pels membres de la Comissió fundacional<sup>18</sup>:

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

*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 hiérarchique 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'immatriculation de l'École polytechnique.

Taula 3 : Evolució de l'origen social dels politècnics (tret de la referència<sup>36</sup>).

És, emperò, ben cert que el caràcter inter-classista dels alumnes de l'École es va anar perdent al llarg dels anys. Alguns historiadors parlen que, ja a mitjans del segle XIX, els costos de l'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, un centenar d'anys després de la fundació de l'École. El temps jugava clarament en favor dels alumnes provenint de la classe d'industrials i negociants, i en contra dels fills de funcionaris. Un aspecte curiós en els orígens de l'École Polytechnique és el denominat *privilegi*\*, atorgant als seus alumnes l'accés exclusiu a certs cossos civils i militars, que fou molt controvertit posteriorment<sup>36</sup>.

## UN NOU ENSENYAMENT

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



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

---

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

Es partia de la idea de què 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 les ciències bàsiques. Posteriorment, al llarg del tercer any, l'estudiant es formava en aspectes concrets de l'enginyeria<sup>40</sup>.

Ja de bon començament, molts dels més prestigiosos científics de l'època, i d'arreu d'Europa, s'oferiren com a professors per a 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.

L'especialització de l'École en les disciplines bàsiques de la ciència va portar a què, poc després, la formació en els aspectes més 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), l'Escola d'Enginyers de Mines, les Acadèmies militars etc.

Tot sovint es parla del dilema ciència pura/ciència aplicada, referint-se a l'orientació formativa dels primers anys de l'École

---

\* Les anomenades *écoles d'application*.

Polytechnique. El dilema està focalitzat en els que foren les personalitats dominants en la primera època<sup>6</sup> (del 1794 al 1825): el geòmetra Monge, com a representatiu d'una orientació de l'ensenyament envers la pràctica, i el matemàtic Laplace més abocat a la formació teòrica<sup>7</sup>. Sembla, però, que aquesta dualitat és més aviat artificial i que no respon ni a unes actituds pedagògiques diferents ni a una disparitat de criteris educatius.

Ambdós són fidels a un mateix sentit de la paraula *inginyer*<sup>13</sup>: *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 més generals, per tant les més teòriques, les més garantides, i per tant les més recents, per a consolidar les possibilitats de les seves aplicacions*<sup>13</sup>.

Fou a l'École Polytechnique a on les classes pràctiques o de laboratori foren introduïdes per primera vegada com a part de l'ensenyament regulat<sup>40</sup>. Les classes es dividien en petits grups, anomenats brigades, de al voltant de vint estudiants, al davant dels quals s'hi posava un instructor, per a resoldre aspectes pràctics dels ensenyaments, fer experiments de laboratori o treballs de camp. Els alumnes més 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<sup>†</sup> 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.

---

\* es parla doncs de la *Escola de Monge* i la *Escola de Laplace*

† una dècada era el període revolucionari de deu dies que substituï a la setmana en el període revolucionari

NOMBRE ANS DE ETUDES.	1799.		1801.		1804.		1813.		1818.		1827.		OBSERVATIONS.
	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	
Analyses.....	120 (6)	25 (1)	60	16	60	16	55	20	55	20	54	20	(a) Y compris l'analyse appliquée à la Géom.
Mécanique.....	(6)	(1)	40	10	30	7	30	15	30	15	30	15	(b) Le cours de Mécanique était tout compris dans la dernière année.
Calculs descriptifs.....	120	25	153	40	110	27	70	30	70	30	72	30	(c) Il n'y avait pas d'index de Physique.
Analyses appliquées à la Mécanique.....	27	7	25	6	20	5	12	5	12	5	16	5	Les leçons avaient lieu dans la nuit des septième jours de chaque décade, que nous n'avons pas compris dans le temps total. (Foy, pages 24 et 25.)
Physique.....	(6)	(1)	25	6	20	5	20	10	20	10	20	10	(d) Y compris les leçons sur le terrain et le lavit.
Chimie théorique.....	80	25	84	20	30	7	30	15	30	15	30	15	
Chimie générale et appliquée aux arts.....													
Grammaire et Belles-Lettres.....					30	7	34	14	36	14	36	14	
Histoire et Belles-Lettres.....													
Dessein topographique.....	27 (6)	6											
Révision de la figure et du paysage.....	120	17	100	28	75	17	70	7	70	7	68	6	

Taula 4 : Contingut de matèries del primer any d'estudis (tret de la referència<sup>36</sup>). Les columnes "temps" indiquen el temps (en tant per cent) dedicat a la docència, i a l'estudi i treball, de cada matèria.

MATHÈME AGRIC. D'ETUDES.	1790.		1848.		1866.		1877.		OBSERVATIONS.
	Nombre des Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	Nombre de Leçons.	Temps.	
Ancêtre.....	48	12	48	11	30	15	45	17	
Mécanique.....	72	17	54	13	60	17	54	19	
Géométrie descriptive.....									
Analyse appliquée à la Géométrie.....			15	4	20	6			
Facilité de.....	54	13	66	15	30	6			
Travaux publics (coulés ou constructions).....	54	13	42	10	30	8			
Travaux des Morts.....	27	6	18	4	10	3			
Art militaire.....									
Machinerie.....									
Condensé.....									
Astronomie sociale.....									
Physique.....	60	15	45	11	25	7	30	7	
Chimie appliquée aux arts.....	60	15	54	13	30	8			
Chimie expérimentale ou manipulative.....	60	15	54	13	30	8			
Chimie générale et appliquée aux arts.....									
Architecture.....	45	11	36	9	30	7	30	8	
Comptabilité des Bâtes-Bâtes.....									
Blanche et Belles-Lettres.....									
Dessein topographique ou Lavis.....					30	7	36	6	
Dessein de la ligne et du paysage.....	120	13	18	4	25	6	35	4	
Leçons et Travaux pratiques.....							70	7	

(1) Il n'y avait pas d'études de Physique. Les leçons avaient lieu dans la matinée de chaque jour de chaque séance, que nous n'avons pas compté dans le temps total. (Voyez page 62 en 1866.)

Taula 5 : Contingut de matèries del segon any d'estudis (tret de la referència<sup>36</sup>). Les columnes "temps" indiquen el temps (en tant per cent) dedicat a la docència, i a l'estudi i treball, de cada matèria.



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-hi mecànica de partícules, mecànica de sòlids rígids i de fluids i una mica d'astronomia), química i dibuix <sup>21</sup> (vegeu la Taula 4 i la Taula 5).

### ... I UNS NOUS LLIBRES DE TEXT

Com que era la primera vegada que aquestes disciplines, eren ensenyades a grups d'alumnes nombrosos, s'imposava l'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 pels 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'Haüy etc.

Aquests llibres, que foren llegits no solament a França sinó, ben aviat, arreu del món, exerciren una gran influència en l'avenç i en l'ensenyament de les ciències fonamentals<sup>40</sup>. Possiblement, qualsevol enginyer d'avui dia que llegeixi aquestes ratlles, trobarà familiars, quan els compari amb els corresponents a la seva pròpia formació, els noms de les assignatures i els títols dels llibres esmentats tot i encara dos-cents anys després. Això és una prova de l'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 simultàniament<sup>13</sup>. 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 l'organització i finançament, des de bon començament, 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 Polytechnique<sup>44</sup>.

Més 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 és ara l'École Normale, i d'altres d'Alemanya i de l'àmbit anglosaxó<sup>44</sup>. 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 NAPOLEÒNICA

La institució, volia ser una *casa de Ciència i Educació* i pretenia una total independència dels poders polítics i econòmics, definint-se com<sup>21</sup>:

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

Tot i això és evident que aquests principis es van subvertir ben aviat. Més enllà dels ideals revolucionaris, els poders polítics no podien, ni volien, deixar passar l'oportunitat d'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 l'organització governamental i de la societat en general; la centralitza, la militaritza i en reforça la burocràcia<sup>36</sup>. 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 L'École Polytechnique per fer-li saber la seva temença que la institució esdevingui un centre d'activitats anti-governamentals<sup>36</sup> manifestant-li que:

*...és perillós donar una formació avançada a gent que no surten de famílies riques. S'haurà, doncs, de canviar el caràcter gratuït de l'escolaritat i fer que els alumnes en paguin els costos.... Per evitar tot risc de revolta dels 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

---

\* 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

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 clar que els seu objectiu final és 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 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 de forma majoritària. 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 de forma majoritària cap a l'exercit (Écoles militars en un 70%) en detriment de les *grands écoles* (École de Ponts et Chaussés 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 Polytechnique deixà de ser un perill pel poder establert. Tot i això, i malgrat el fet que l'extracció social dels alumnes provenia ara de forma majoritària de la burgesia, no deixà d'haver-hi una certa contestació, en forma de conviccions antibonapartistes expressades en inscripcions als murs de la vella École, contra l'Església i la corrupció de la nova aristocràcia, contra la supressió de les llibertats i de la igualtat, i contra la militarització de l'Estat<sup>36</sup>.

L'historiador Fourcy, a la seva obra, *Histoire de l'École Polytechnique*<sup>18</sup>, dóna algunes indicacions que hi havia, entre els anys 1810-1821:

*...una mena d'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, 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 país<sup>36</sup>.

La reforma deixà profundament marcada l'École Polytechnique per a 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 els 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

---

\* la raó de la situació és il·lustrativa d'un especial concepte 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.

Tanmateix, és cert que, anteriorment, Napoléon havia proporcionat, directa o indirectament, algunes noves possibilitats de creixement científic de l'École Polytechnique: l'expedició de Bonaparte a Egipte, al 1798, s'emportà una missió científica de cent seixanta-cinc membres entre els que s'inclouïen alguns destacats 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 l'expedició va inaugurar la nova ciència de l'*egiptologia* quan, al seu retorn va publicar el tractat *Description de l'Égypte*<sup>\*</sup> (vegeu la Figura 5).

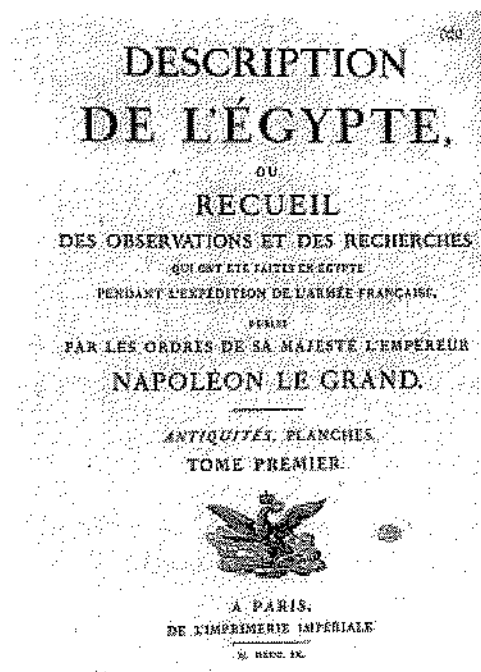


Figura 5: Portada de l'obra *Description de l'Égypte*

---

<sup>\*</sup> 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 sí.

En qualsevol cas, i tal com manifesta l'historiador J. Shinn<sup>36</sup>, 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 empremta. 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 és que, des d'aleshores, l'École Polytechnique va retrobar, d'una banda, el concepte 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 elit 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?

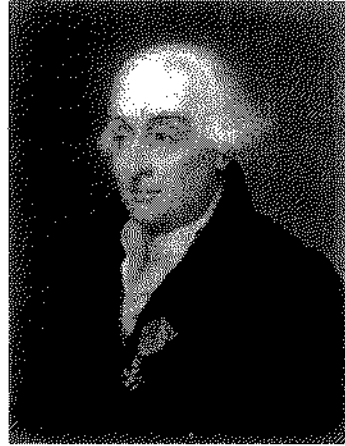
La llista de professors i alumnes, de l'École Polytechnique, que van fer contribucions cabdals al món de la ciència, en general, i de l'enginyeria, en particular, és aclaparadora... Només durant els primers cinquanta anys de vida de la institució tenim a *Lagrange, Cauchy, Laplace, Ampère, Navier, Poisson, 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 és 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 d'especials virtuts científiques i humanes, li han permès fer-ne una selecció de noms, dels que se'n 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*. Més 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 pitjor, 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'École 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*.

Ahora, era molt reconegut pels seus col·legues<sup>38</sup> 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 *Comte de l'Imperi* al 1808. Va morir cinc anys més tard al 1813.

## FOURIER (1768-1830)

Tothom qui 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 que també ho fes la seva mare, quan Fourier tenia, només, nou anys.



Jean Baptiste Fourier

Educad 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 ha 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. Amb vint-i-set anys, tan sols, va ocupar plaça de professor a l'École, però les raons polítiques el perseguïen 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 companya d'Egipte on hi va participar com a membre destacat de la missió científica que, entre altres coses, trobà la famosa pedra de 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.

Escrigué el treball anomenat *Teoria analítica de la calor* que tracta sobre la transmissió de la calor en sòlids; la realitat és aquest treball va molt més enllà del que el seu títol indica; va encetar el camp de l'anàlisi lineal a la matemàtica moderna. Com sòl 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 1822, 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 d'entendre i d'ensenyar l'enginyeria a les generacions d'enginyers que el van seguir. Com a conseqüència de la seva estada a Egipte, Fourier va ser coautor, també, del llibre *Description de l'Égypte*, que fou el més ampli estudi d'egiptologia fet fins al moment.

## CAUCHY (1789-1857)

Qui davant d'un text d'anàlisi matemàtica o d'un tractat d'elasticitat o de mecànica dels medis continus, no s'ha trobat el nom de Cauchy, una i altra vegada encapçalant postulats, teoremes o formulacions?

Agustin-Luois 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



Agustin Cauchy

dels millors científics del país, com Lagrange, Laplace i Berthollet, que es reunien a casa de Laplace. Cauchy, va tenir l'oportunitat de tractar-los, i, estimulat per aquesta experiència, va créixer amb un intel·lecte inquiet. Al 1805 passà l'examen d'entrada de l'École Polytechnique, examinat pel famós físic Jean-Batiste Biot i va ser admès en el lloc número dos.

Ja de bon començament va demostrar una extraordinària competència i capacitat en matemàtiques. Quan va acabar la seva formació al Polytechnique va entrar a l'École de Ponts et Chaussées, 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 haver d'aturar, 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 contínuament 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 l'originalitat i rigor dels seus ensenyaments.

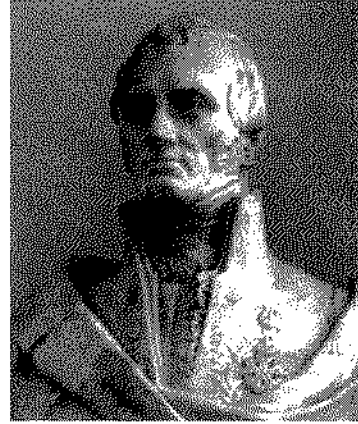
Una vegada a l'École Polytechnique, va entrar en contacte amb els treballs de Navier sobre la Teoria de l'Elasticitat. Els va trobar tan estimulants que s'hi va dedicar amb passió. El resultat van ser unes enormes contribucions al desenvolupament i formalització de la teoria matemàtica de l'elasticitat. A ell li devem, entre moltes d'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 etc... Les seves contribucions en aquest camp van ser, i encara son, d'una immensa vàlua<sup>40</sup>.

Malgrat el seu geni científic, Cauchy, de caràcter complicat i molt introvertit, va ser un home de relacions personals dificultoses i no gaire benvolgut pels seus col·legues. Continues disputes sobre l'autoria de diversos desenvolupaments el van enfrontar amb alguns d'ells. Durant la seva vida va produir set-cents vuitanta-nou treballs científics que van ser compilats en les seves obres completes<sup>8</sup> en vint-i-cinc volums... uns nombres extraordinaris!

## NAVIER (1785-1836)

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

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



Claude Navier

Durant la seva estada a l'École va tenir com a professor a 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 és 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 d'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 dramàticament el perfil empíric amb que s'impartia fins aleshores aquesta disciplina, per un ensenyament més basat en fonaments físics i matemàtics. Al 1831 va substituir a Cauchy com a professor de càlcul i matemàtiques a l'École Polytechnique.

Navier és molt conegut per les seves aportacions a diferents camps de la Ciència. Sense anar més 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 són 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 Materials<sup>40</sup>.

Fou també un gran divulgador d'obres dels seus predecessors, que enriquia, 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 dels 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 professió<sup>38</sup>.



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 estudis<sup>16</sup>.

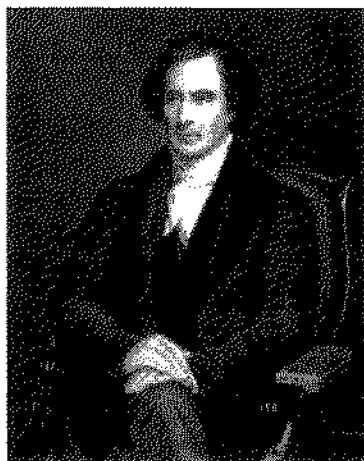
A l'École Polytechnique va impressionar a tothom per la seva capacitat, fins al punt que va ser dispensat de realitzar els exàmens de sortida de l'École. Malgrat això, les seves dificultats de coordinació li feien molt difícil el treball en matèries com el dibuix i la geometria descriptiva, i no va plantejar-se 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 l'Elasticitat* li dèu el reconeixement de l'efecte de contracció lateral associada a l'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 las 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: l'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 amb vint-i-tres ja n'era professor d'Anàlisi i Geodèsia. També va ser-ne després el director, l'anomenat *comandant* en aquella època.



Jean François Arago

Les seves contribucions científiques més 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 lliçons d'astronomia, obertes al públic en general, van esdevenir cèlebres per la seva admirable claredat<sup>16</sup>.

Va formar part de la comissió que mesurà la longitud de l'arc del meridià terrestre, i que va conduir a l'estandardització del sistema mètric. En aquest quefer, participà en una expedició geodèsica per les costes catalanes i mediterrànies, per perllongar la mesura del meridià de Dunkerke-Barcelona, i que sembla una autèntica novel·la d'aventures<sup>22</sup>: quan estava acabant les mesures a Mallorca, s'inicià la guerra d'entre Espanya i França i fou 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 què el català era la seva llengua materna. El vaixell és capturat per pirates i empresonat al nord d'Àfrica. Una vegada alliberat, embarca cap a Marsella, però el seu vaixell és capturat per un vaixell espanyol i empresonat a Espanya. Alliberat de nou, embarca una 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 és perseguit, ara per un vaixell anglès, però finalment arribà a Marsella sà i estalvi i a on fou rebut triomfalment.

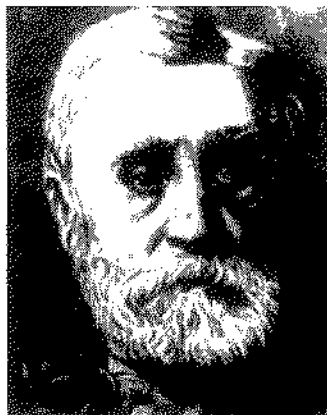
El seu caràcter ferri i el seu esperit científic queda reflectit en el fet que, amb totes aquestes peripècies, aconseguí salvar els amidaments geodèsics que havia fet, i lliurar-los a la comissió que els hi havia encarregat.

Aragó va tenir una vida pública molt destacada. Addicionalment a la seva activitat científica, va desenvolupar una intensa activitat política. De conviccions fermament republicanes, va ser aclamat, al febrer del 1848, amb motiu de l'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'École Polytechnique al 1813, a l'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.

Al 1814 els exèrcits aliats s'apropaven a París i els estudiants de l'École foren



Barré de Saint-Venant

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 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 promoció<sup>40</sup>. 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 l'elasticitat i de la resistència de materials són innumbrables. Seus són els estudis de les distribucions tensionals en peces prismàtiques, sotmeses a torsió (l'anomenada *Torsió de Saint-Venant*<sup>3</sup>). Seu és el principi conegut com *Principi de Saint-Venant* que ens parla de la rellevància, en la determinació dels estats tensionals remots, no tant de les forces exteriors com de la seva resultant local, introduint així el concepte fonamental *d'esforç* que ha estat fins als nostres dies l'element bàsic de l'anàlisi estructural. Seua és, sobre tot, una posició personal, davant dels defensors de l'enginyeria empírica, de què el progrés en l'enginyeria només podria assolir-se si es combinaven la intuïció i l'experimentació amb els estudis teòrics rigorosos i el mètode científic... en altres paraules: si l'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 amb setanta-un anys fou admès

---

\* referint-se a Napoleó

com a membre de l'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 d'estranyar-nos, 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... al 1972! <sup>16</sup>. Tot i això, hi ha el cas singular de Sophie Germain, que val la pena explicar.



Sophie Germain

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.

El seu desig d'entrar a l'École Polytechnique no podia ésser 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 categoria 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 l'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<sup>28</sup>. Malgrat això, i possiblement per la seva condició de dona, el seu nom no és un dels setanta-dos gravats a la façana del primer pis la Torre<sup>27</sup>, 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!<sup>39</sup>.

## IV.- UN EXEMPLE PARADIGMÀTIC: L'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 més peremptòria. Amb el temps, aquestes construccions es van tornar més ambicioses i sofisticades i l'experiència va demostrar que no es podia construir de manera arbitrària... que algunes formes i alguns materials eren més apropiats que d'altres per als fins pretesos: resistir l'acció del pes propi i de les accions exteriors de forma fiable i duradora.

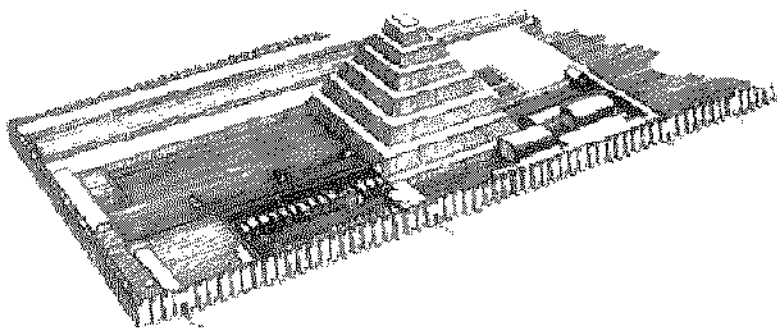


Figura 6: Piràmide de Saqqara (Egipte)

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 que una part diferenciada s'encarregués de la resistència a les càrregues a les que estava sotmesa<sup>42</sup>; és el que anomenem l'estructura resistent d'una construcció o, d'una manera més sintètica, *l'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 dels 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 obeliscos; construccions que han desafiat el pas del temps i han arribat fins als nostres dies<sup>40</sup>. 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 6).

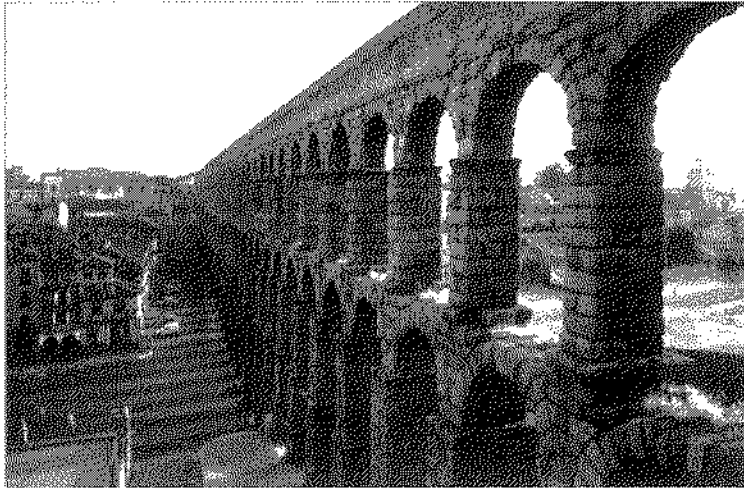


Figura 7: Aqueducte de Segovia



Els antics Grecs tenien ja coneixements de mecànica (la famosa palanca de l'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 és el famós Panteó, construït el 123 a.C., que romangué durant gairebé divuit segles, amb els seus 44 metres de llum, com la cúpula més gran del món (vegeu la Figura 8). 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.

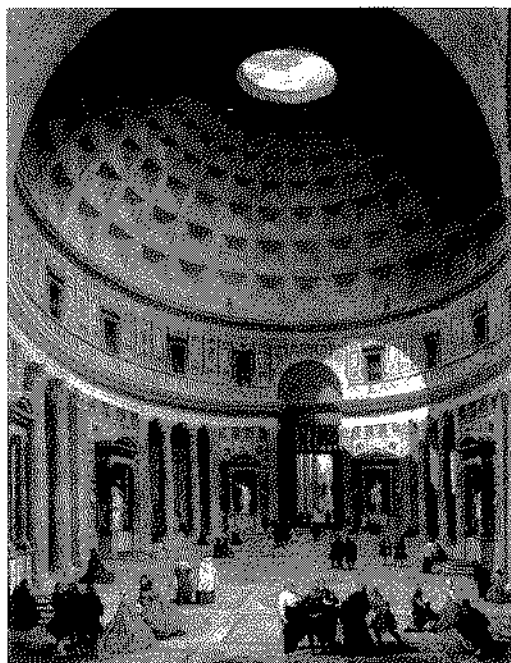


Figura 8: Interior del Panteó de Roma, pintat per Giovanni Paolo Panini.

Gran part del coneixement d'enginyeria estructural que tenien grecs i romans es va perdre a l'edat mitjana i no es va poder

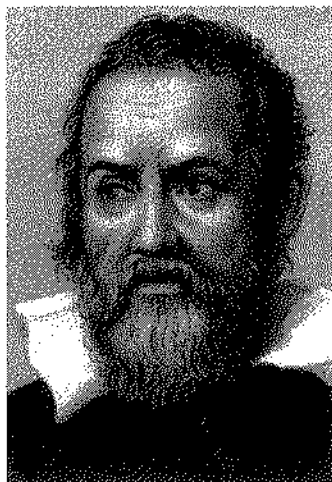
recuperar fins al renaixement. En el segle XVI *Andrea Palladio* va fer servir les primeres cintres en la construcció de ponts i sostres d'edificacions, però els seus dissenys no tenien una base racional. El propi Palladio expressava en les seves obres que:

*.... per al seu dimensionament no és possible establir regles certes i determinades*<sup>37</sup>.

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 més 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

Galileu (1564-1642) inaugurà l'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 9), 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

DISCORSI  
E  
DIMOSTRAZIONI

MATEMATICHE,

*intorno à due nuove scienze.*

Attenenti alla

MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI;

*del Signor*

GALILEO GALILEI LINCEO,

Filosofo e Matematico primario del Serenissimo  
Grand Duca di Toscana.

*Con una Appendice del centro di gravità d'alcuni Solidi.*



IN LEIDA,

Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.

Figura 9: Portada de *Diàlegs sobre dues noves ciències* (Galileu, 1638)

Amb una ampul·lositat que avui dia ens pot semblar ingènua, Salviati/Galileu 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:

- Galileu disposa només dels conceptes mecànics d'equilibri que li arriben dels filòsofs grecs, a través dels tractats d'Aristòtil i d'Arquimedes. Aplica el concepte d'equilibri de moments a partir de la llei de la palanca, que justifica en llargs paràgrafs dels seus diàlegs\* (vegeu la Figura 10).



Fig. 15

Figura 10: Estudi sobre la llei de la palanca (*Diàlegs sobre dues noves ciències*, Galileu, 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 11), i la resistència a la ruptura de la peça com la suma de la resistència de cada fibra (vegeu l'Annex II).
- Galileu encara està lluny d'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 12), associa la causa de la ruptura als valors de les forces de normals

---

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

de reacció a la part inferior de la secció d'empotrament (vegeu l'Annex III)

➤ La resistència a la ruptura que calcula equival a una

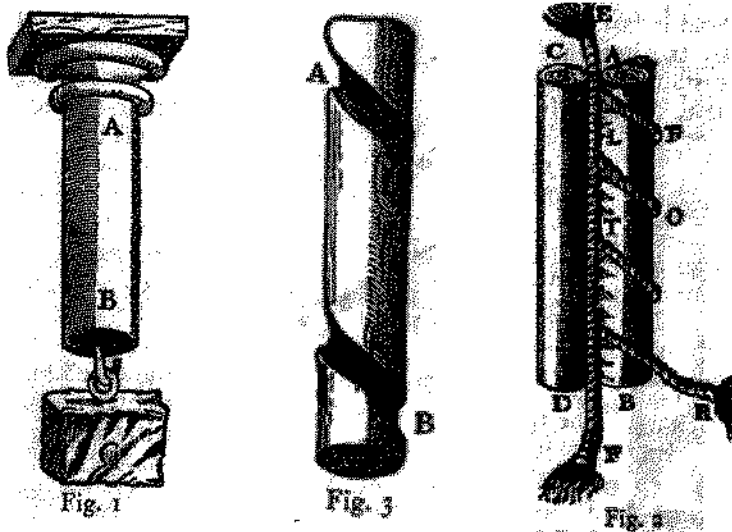


Figura 11: Estudi de peces a tracció (*Diàlegs sobre dues noves ciències*, Galileu, 1638)

distribució uniforme de l'acció\* sobre la secció transversal de la peça... lluny doncs de la correcta distribució lineal que avui acceptem com a correcta.

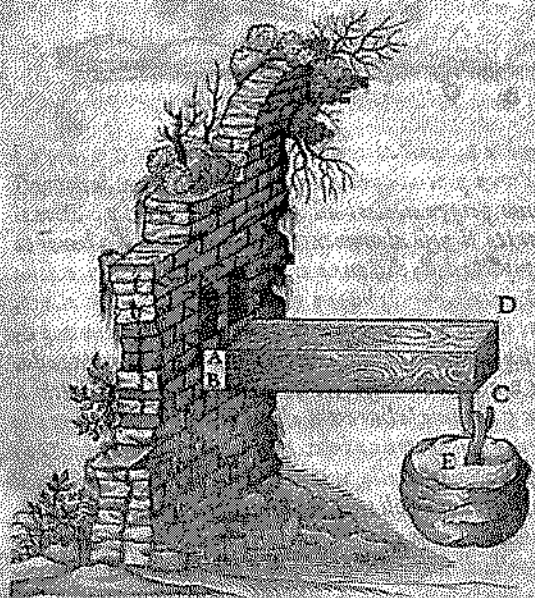
➤ El tractament que fa en els seus estudis, correspon sempre al de sòlid indeformable i està encara molt lluny d'esbrinar els mecanismes de treball de les peces hiperestàtiques.

Tot i això és rellevant com, mitjançant experiments i principis heurístics, Galileu va poder aproximar-se prou 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 Galileu.

sia qui dichiarate, non sarà difficile l'intender la ragione, onde au-  
 uenga, che un Prisma, o Cilindro solido di vetro, acciaio, legno, o  
 altra materia frangibile, che si speso per lungo sotterra gravissimo  
 peso, che le sia attaccato, ma in trasverso (come parca di chiamar) da  
 minor peso assai potrà tal volta essere spezzato, secondo che la sua  
 lunghezza eccederà la sua grossezza. Imperò che figuriamoci il Tris-  
 ma solido A B, C D fito in un muro dalla parte A B, e nell'altra  
 estremità vintenda la forza del Peso E. (intendendo sempre il mu-  
 ro esser eretto all'Orizzante, & il Prisma, o Cilindro fito nel muro  
 ad angoli retti) è manifesto che donendosi spezzare si romperà nel

Prop.  
 1.



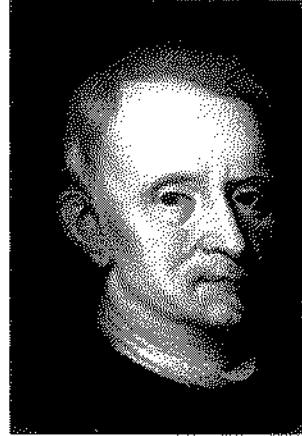
luogo D, dove  
 il taglio del  
 muro seruo  
 per sostegno, e  
 la B C per la  
 parte della  
 Lena, dove si  
 pone la forza,  
 e la grossezza  
 del solido A B  
 e l'altra parte  
 della Lena,  
 nella quale è  
 posta la resi-  
 stenza, che  
 consiste nel-  
 lo staccamen-  
 to, che s'ha  
 da fare della  
 parte del solido  
 da A D, che è

fuor del muro, da quella che è dentro, e per lo esse dichiarate il mo-  
 mento della forza portata in C al momento della resistenza che si fa  
 nella

Figura 12: Estudi de ruptura de mènsules (Diàlegs sobre dues noves  
 ciències, Galileu 1638)

## ROBERT HOOKE

Robert Hooke (1635-1703) ha estat de vegades anomenat el Leonardo anglès<sup>4,9</sup> per l'amplitud dels seus coneixements i dels seus àmbits de recerca. Nascut a l'illa de Wright (Regne Unit) estudià a Oxford on un dels seus professors fou el famós químic Robert Boyle amb qui després mantingué una intensa correspondència científica (vegeu la Figura 13). 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, (és molt conegut el seu llibre *Micrographia*<sup>23</sup> sobre observacions amb un microscopi de la seva invenció, i on va formular una teoria ondulatòria 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 és l'estudi de les propietats elàstiques dels materials. En el seu llibre *Lectures de potentia restitutiva*<sup>25</sup>, publicat al 1678, va investigar les propietats elàstiques d'objectes simples i molles flexibles que avui condensem en la famosa *Llei de Hooke*:

$$\sigma = E \varepsilon$$

que estableix la proporcionalitat entre la tensió,  $\sigma$ , i la deformació,  $\varepsilon$ , a través d'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.

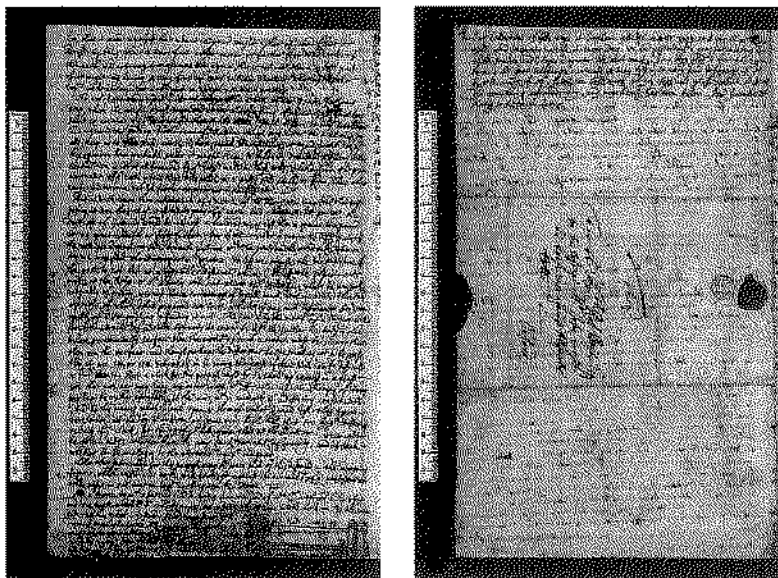


Figura 13: Carta de Robert Hooke a Robert Boyle

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

cediinnoopssttuu

del que en proporcionava la solució, dos anys després, en el tractat *De potentia restitutiva*<sup>25</sup> (vegeu la Figura 14):

Ut Pondus sic Tensia

que es traduiria literalment per:

*com és el pes així és la tensió*<sup>\*</sup>

---

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



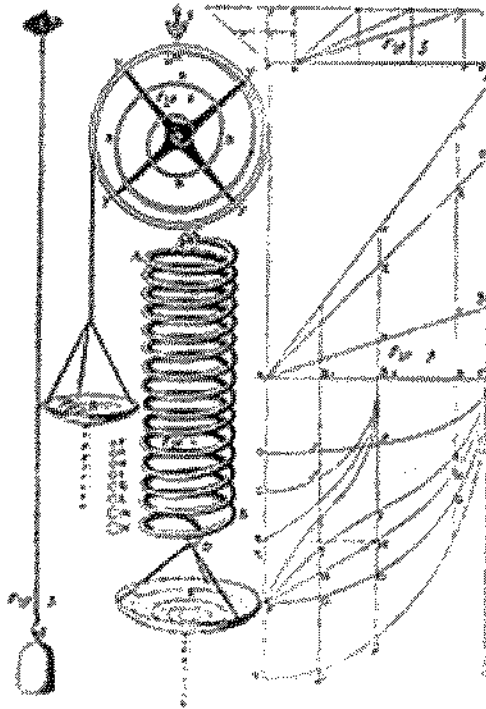


Figura 14: Esquema de l'estudi de propietats elàstiques a *De Potentia Restitutiva* (Robert Hooke, 1678)

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 15):

abcccddeceeeefggiiiiiiiillmmmmnnnnn

ooprssstttttuuuuuuuuux

que, segons manifesta, es:

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

To fill the vacancy of the ensuing page, I have here added a *deductive* of the *certifine* of the Inventions I intend to publish, though possibly not in the same order, but as I can get opportunity and leisure; most of which, I hope, will be as useful to Mankind, as they are yet unknown and new.

1. *A way of Regulating all sorts of Watches or Time-keepers, so as to make any way to equalize, if not exceed the Pendulum-Clocks now used.*

2. *The true Mathematical and Mechanical form of all manner of Arches for Building, with the true batment necessary to each of them. A Problem which no Architectonick Writer hath ever yet attempted, much les. performed. abcce ddeeee fgg ii iiiii lllmmnnnnnoopprr sssstttttuuuuuuuuux.*

3. *The true Theory of Elasticity or Springiness, and a particular Explication thereof in several Subjects in which it is to be found: And the way of computing the reflexity of Bodies moved by them. colliposicuum ut vis sic timpan*

4. *A very plain and practical way of counterpoising Liquors, of great use to Hydrostaticks. Discovered.*

5. *A new sort of Object-Glasses for Telescopes and Microscopes, much surpassing any yet used. Discovered.*

Figura 15: Anagrama sobre les formes anti-funiculars (*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:

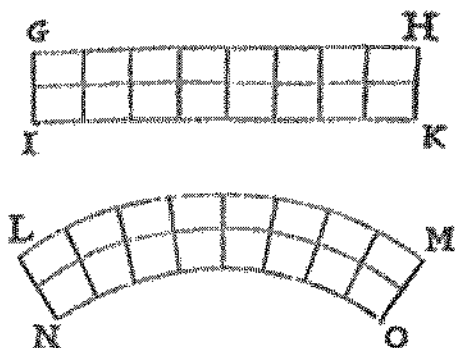
... Així com penja un cable flexible, així invertit, així  
es troben les peces contigües d'un arc,...

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

on s'hi pot reconèixer que la forma òptima d'un arc per aguantar el seu pes és la d'una catenària\* invertida. A més són notables algunes contribucions de Hooke a l'anàlisi de la deformació de bigues a flexió com a elements elàstics (vegeu la Figura 16).

[15]

Having thus explained the most simple way of springing in solid bodies, it will be very easy to explain the compound way of springing, that is, by flexure, supposing only two of these lines joynd



together as at GHIK, which being by any external power bended into the form LNNO, LM will be extended, and NO will be diminished in proportion to the flexure, and consequently the same proportions and Rules for its endeavour of restoring it self will hold.

Figura 16: Estudi de mecanismes flexibles i de flexió de bigues a *De potentia restitutiva* ( Robert Hooke, 1678)

Com en el cas de Galileu, les contribucions de Hooke a l'anàlisi estructural són plenes d'empirisme i d'intuïció, però estan lluny de sorgir d'un tractament científic rigorós. Més específicament:

\* forma que adopta una cadena (o qualsevol altre element estructural sense resistència a flexió) subjecte pels seus extrems i sota el seu propi pes.

- 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, és 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 l'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'abat del Priorat de St. Martin de Beaumont-sur-Vingeanne.

Des de ben aviat començà a destacar per la seva recerca científica que el va portar, al 1666, a ser un dels primers membres de la recentment instaurada Acadèmia de Ciències de París.



Edme Mariotte

---

\* En els treballs de Hooke es parla essencialment de *elongació* (allargament) i no de *deformació* (allargament per unitat de longitud inicial). Seria, doncs, poc acurat 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 seus tractaments científics que demandaven una exhaustiva corroboració experimental a qualsevol teoria abans de donar-la per vàlida<sup>12</sup>. 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 17) i també les teories de Galileu sobre la flexió de bigues en els *Diàlegs sobre dues noves ciències*.

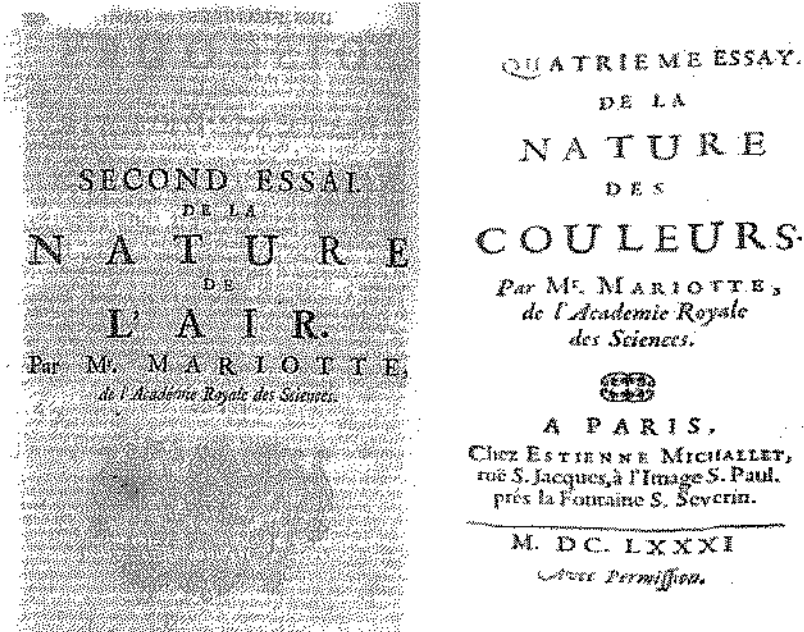


Figura 17: Assaigs científics de Edme Mariotte (1681)

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

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

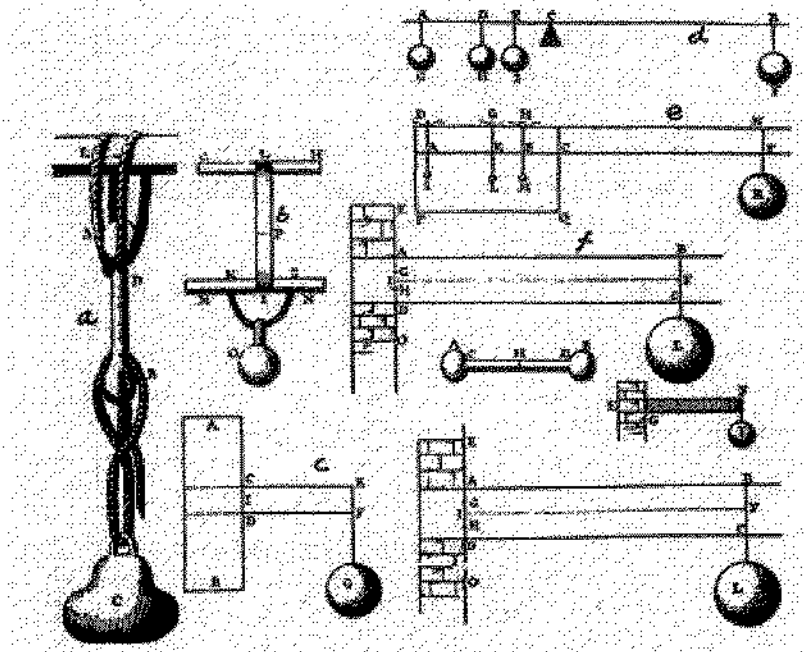


Figura 18: Estudi sobre comportament a tracció i flexió de bigues de Edme Mariotte<sup>29</sup>

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, encuriolit per millorar la resistència dels tubs, mentre dissenyava el sistema de portada d'aigües al palau de Versailles. Heus aquí els seus resultats:

- Anant més enllà que Galileu, Mariotte va intuir que la distribució de l'esforç sobre la secció transversal d'una biga a flexió no era uniforme (tal com postulava Galileu) 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 Galileu (vegeu la Figura 19).

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

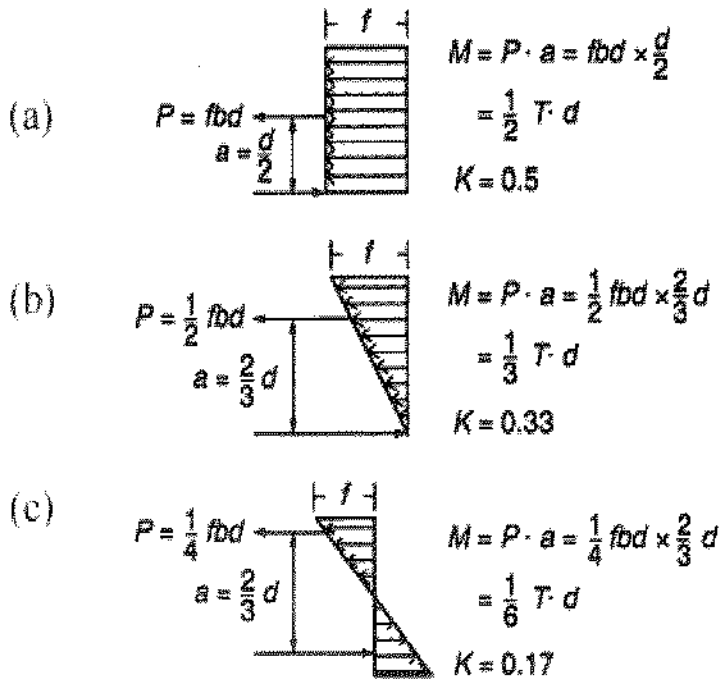


Figura 19: Evolució de l'estimació de la distribució de l'esforç flector,  $M$ , sobre una secció de peça prismàtica a flexió: a) Galileu (1638) b) Mariotte (1670) c) Parent (1713)

## JACOB BERNOUILLI

Jacob Bernouilli (1654-1705) fou un dels il·lustres membres de la família Bernouilli\*, i l'iniciador de la saga (vegeu la Figura 20). La família Bernouilli 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.



Mentre Galileu i Mariotte es dedicaren a estudiar les condicions de ruptura de les estructures, Jacob Bernouilli en va començar a estudiar la seva deformació. Sòl esmentar-se el nom de Jacob Bernouilli com el primer en utilitzar la hipòtesi de deformació plana de la secció transversal d'una peça prismàtica†. La rotació de la secció, emperò, és produïa, segons Bernouilli, de manera que la fibra neutra és situada a l'extrem inferior de la secció i, per tant, els resultats, en quant a la capacitat resistent d'una peça prismàtica a flexió, eren iguals als obtinguts per Mariotte (vegeu la Figura 19) i, per tant, erronis.

Però altres resultats de Bernouilli en quant a la deformació de peces prismàtiques foren molt més precisos. Seva va ser la

---

\* Família d'il·lustres científics dels segles XVII i XVIII. Els més rellevants foren: Jacob Bernouilli (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 Bernouilli ocupaven simultàniament càtedres a les més rellevants universitats europees.

† avui dia denominada *hipòtesi de Bernouilli*



primera contribució analítica a la flexió elàstica d'una biga que publicà en forma de logogrif al 1691:

Qrzumubapt dxqopddbpb...

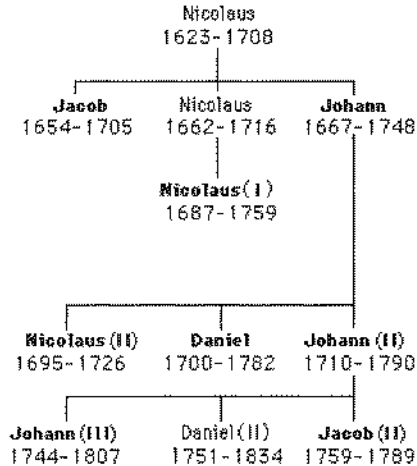


Figura 20: Arbre genealògic de la família Bernoulli (en negreta els membres més eminents de la saga)

De la qual en donà el codi<sup>35</sup> per desxifrar-lo al 1694. El resultat descodificat\* es:

Portio axis applicatem.....

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

\* 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*.

Alguns resultats de Jacob Bernouilli sobre integració de corbes elàstiques, es poden trobar a les Actes de l'Acadèmia de Ciències de París<sup>5</sup> (vegeu la Figura 21).

176 MEMOIRES DE L'ACADEMIE ROYALE

VERITABLE HYPOTHESE

DE LA

RESISTANCE DES SOLIDES,

Avec la Démonstration de la Courbure des  
corps qui font Ressort.

Par M. BERNOULLI Professeur à Bâle.

Lettre du 11. Mars 1705.

1701.  
4 Juillet.

**P**OUR faire mieux entendre ce que je diray en son tems du Centre de Tension, suivant la promesse que j'en ay faite dans mon Mémoire du 13. Mars 1703. je croy devoit expliquer auparavant une hypothèse qui me paroît le véritable Principe de la Résistance des Solides, & en tirer la démonstration de la courbure que prennent les ressorts plies, à laquelle on a donné le nom d'*Elastique*.

Galilée est le premier qui ait examiné cette résistance des corps & qui ait cherché combien il falloit plus de force pour rompre un corps solide en le tirant directement suivant sa longueur, que pour le rompre transversalement. Pour cette effet il considéra une poutre, une planche ou

FIGURE 1. une perche prismatique *ABC D* fichée horizontalement dans un mur *AA* avec un poids *P* suspendu à son extré-

Figura 21: Estudi de Jacob Bernouilli, 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 París 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.

88 HISTOIRE DE L'ACADEMIE ROYALE.



### E L O G E

D E M. P A R E N T.

**A**NTOINE PARENT naquit à Paris le 16 Septembre 1666. Ses Ayeux étoient de Chartres, son Pere étoit né à Paris, fils d'un Avocat au Conseil.

Il n'avoit pas encore trois ans, quand Antoine Mallet, Oncle de sa Mere, Curé du Bourg de Léves auprès de Chartres, le fit emporter pour l'élever chés lui. Ce Curé gouverna sa Paroisse pendant 54 ans avec la réputation d'un saint Prêtre, d'un bon Theologien, & même d'un affés habile Naturaliste. Il fut le seul Précepteur de son Neveu, ou plutôt son seul Pere. Comme il ne lui put enseigner que les premieres regles de l'Arithmetique, & que l'Enfant ne s'en contentoit pas, il fallut lui donner quelques Livres qui allaient plus loin, mais ce n'étoient que des Regles sans démonstrations, & l'Enfant ne s'en contentoit pas encore. Il tâcha de trouver des preuves par lui-même, vint à bout de quelques-unes, ne put réussir à d'autres, & enfin à l'âge de 13 ans il avoit rempli d'une espece de Commentaire toutes les marges d'un Livre d'Arithmetique, marque déjà certaine d'un genie Mathématique qui se dévelopoit, & dont les forces naissantes demandoient à s'exercer.

Figura 22: Elogi de A. Parent a *Història de l'Acadèmia de Ciències de París*, de Fontanelle (1716)

Com a ajudant d'altres acadèmics va participar en nombroses tasques científiques a l'Acadèmia de Ciències de París, 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* (París, 1700) i *Recherches de physique et de mathématiques*<sup>33</sup>.

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 Bernouilli, de manera correcta en el centre de gravetat de la secció transversal (vegeu la Figura 19).

## LEONARD EULER

L'insigne matemàtic Leonard Euler (1707-1783) va néixer a Basel (Suïssa) on va tenir l'oportunitat d'assistir a les classes de matemàtiques de Johann Bernouilli qui, en 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 tsarina Alexandra II, a l'Acadèmia de Ciències de Sant Petersburg.



Leonard Euler

Euler és conegut, i reconegut, per les seves contribucions a les matemàtiques, especialment a la creació del càlcul infinitesimal. Però també va tenir una important

contribució a l'anàlisi estructural; especialment en la seva investigació sobre les corbes elàstiques\*.

Aprofitant el 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 l'equació diferencial d'una mènula a flexió per una càrrega  $P$  al seu extrem<sup>40</sup>:

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

equació a la que ja havia arribat Jacob Bernouilli amb anterioritat (vegeu Figura 23). Euler<sup>17</sup> la va integrar, arribant a l'equació de la elàstica i de la fletxa,  $f$ , a l'extrem carregat<sup>†</sup>:

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

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 fórmula 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 potència del cantell). Euler, però va establir, erròniament, la proporcionalitat de  $C$  a la segona potència del cantell de la biga.

# SOLVTIO PROBLEMATIS

DE

*Inuenienda curua, quam format lamina ut-  
cumque elastica in singulis punctis a  
potentiis quibuscumque sollicitata,*

*Auctore*

Leonhardo Eulero.

M. Fabr.  
1728  
Tab. IV.

**C**urua, quam Cel. Iacobus Bernoulli primus et postea plures alii laminae elasticae incuruatae assignarunt, quaeque nomine curuae elasticae nota est, nonnulli laminae elasticae grauitatis experti competere ex solutionibus eorum intelligitur. Curuatura autem laminae elasticae grauis, tametsi haec sola in rerum natura locum obtinere queat, tamen a nemine adhuc, quantum scio, determinata est. Incidimus nuper Clar. D. Bernoulli, et ego in hanc quaestionem, eamque non inelegantem exillimantes aggressi, atque solutiones eodem tempore et egregie inter se congruentes consequuti sumus. Cum vero solutio

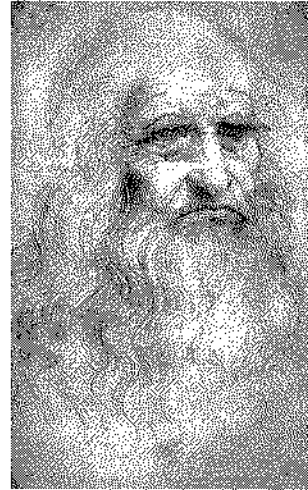
Figura 23: Primera pàgina del treball d'Euler del 1728 sobre corbes elàstiques (observeu la menció inicial a Jacob Bernouilli)

Els treballs de Jacob Bernouilli i Leonard Euler van deixar pràcticament enllestida la teoria de flexió de bigues rectes. És 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 multidisciplinària, també apareix en els orígens de la mecànica estructural. Malgrat que la historiografia clàssica<sup>40</sup> no li atorga un paper rellevant al respecte, i situa els orígens de l'enginyeria estructural en Galileu (un centenar d'anys després de Leonardo), un descobriment bibliogràfic recent ha canviat aquest concepte. El denominat *Manuscrit de Madrid*<sup>2</sup>, descobert al 1967 a la Biblioteca Nacional d'Espanya, i que havia romàs desaparegut durant més de cinc-cents anys, prova que Leonardo havia avançat, encara més que Galileu, en la solució correcta de la, avui encara denominada, teoria de bigues de Euler-Bernouilli. 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 24):



Leonardo da Vinci

*... Sobre la flexió de molles (peces elàstiques): Si una peça recta flecta, és necessari que la seva part convexa esdevingui més gruixuda i la part còncava més estreta, Aquesta modificació és 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*

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

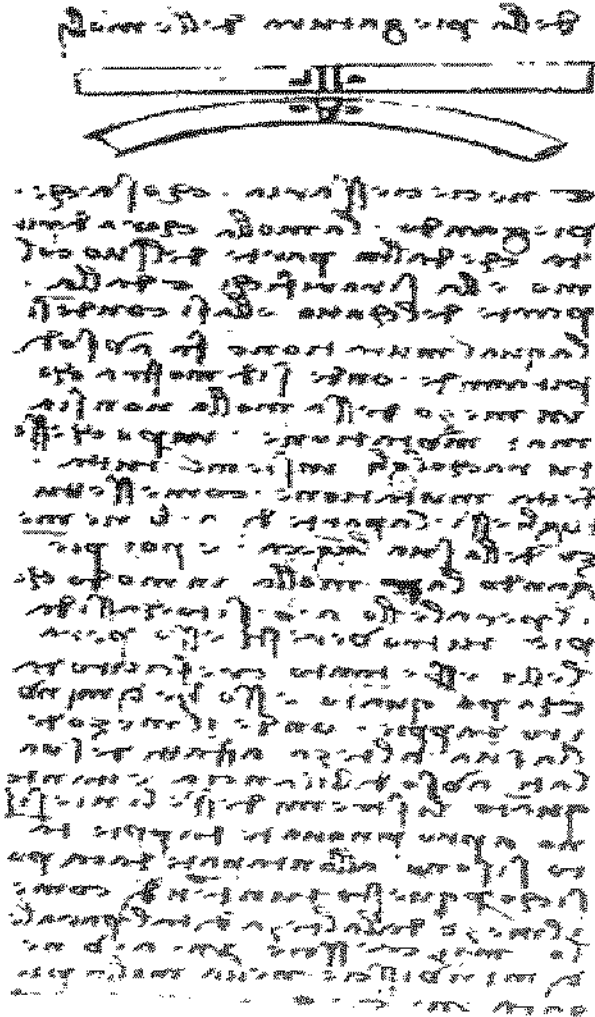


Figura 24: Reproducció del foli 84 del *Codi de Madrid* (manuscrit original de Leonardo da Vinci) sobre la teoria de bigues. Tal i com era costum en Leonardo, el manuscrit està escrit en imatge especular (de dreta a esquerra).



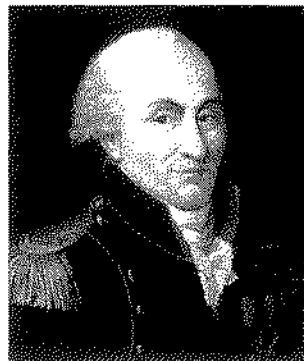
*En conseqüència, en el centre de la seva alçada s'ha comportat com una balança respecte als dos costats. I els extrems de les línies s'han ajuntat tant en la part inferior com s'han separat a la part superior. D'això n'entendreu perquè en el centre de l'alçada de les paral·leles mai augmenta en a-b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

En aquest sentit sembla totalment apropiada la recent proposta<sup>2</sup> 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) és molt conegut pels seus treballs científics sobre l'electromagnetisme, però fou també l'autor de contribucions molt destacades en els camps de la mecànica i de l'anàlisi estructural.



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

C.Agustin Coulomb

sorgí la coneguda *lei de fricció de Coulomb*. En relació amb aquest tema, Coulomb emergeix com un dels fundadors de la *Geotecnia* en desenvolupar la primera teoria matemàtica per al càlcul de l'empenta dels terrenys sobre els murs<sup>19</sup>.

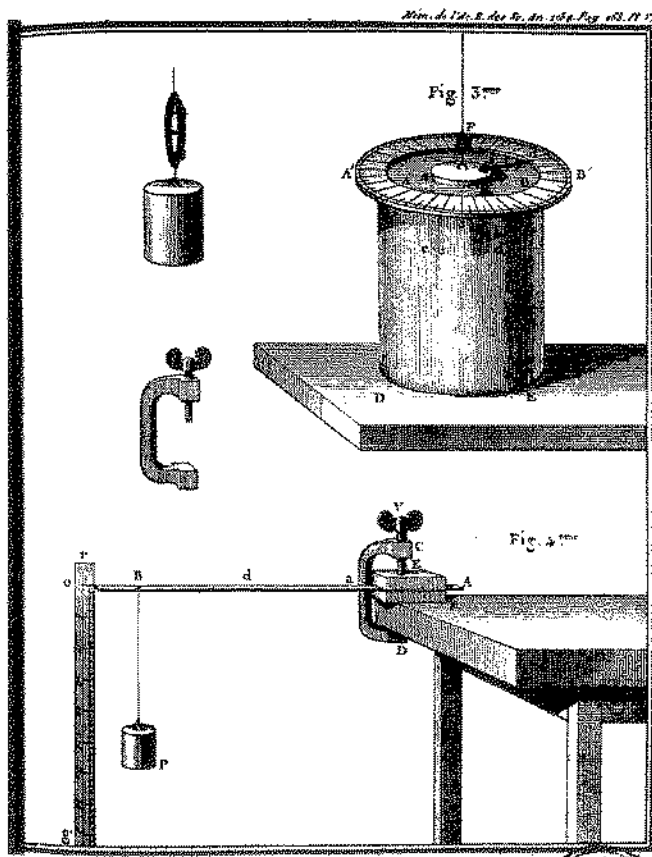


Figura 25: Dispositiu experimental de Coulomb per a la realització d'estudis sobre la torsió.

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<sup>10, 11</sup>. 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<sup>1, 20</sup>.

*...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 l'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 6):

---

\* 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.)<sup>\*</sup>.
- 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, bidimensionals o tridimensionals, transversals de la deformació eren de forma majoritària 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 és ben cert que eminents científics, com és 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 l'època, els nous descobriments eren patrimoni d'un reduït grup d'iniciats i el procés d'aplicació pràctica massa lent. Els canals de distribució d'aquests nous coneixements (les Universitats i les Acadèmies de Ciències) arribaven a un nombre molt

---

<sup>\*</sup> 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 més escassament, a persones interessades en l'enginyeria.

NOM	DATES	OBRES MES RELLEVANTS SOBRE MECÀNICA ESTRUCTURAL	APORTACIONS A L'ANALISI 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 à 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 inveniendis curvis... (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 6: 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 romaní 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 fou l'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 i accions en un medi elàstic<sup>†</sup>, arribant a les equacions diferencials que descriuen l'equilibri d'un conjunt infinit de

---

\* Vegeu la pàgina 40

<sup>†</sup> 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.

molècules sotmeses a forces d'atracció i repulsió moleculars (vegeu la Figura 26), 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 elàstic<sup>40</sup>. En aquest context va estudiar també la propagació d'ones en un medi elàstic.

SUR LE MOUVEMENT DES CORPS ÉLASTIQUES. 387

équations :

$$\left. \begin{aligned} X_p &= \frac{dP_1}{dz} + \frac{dP_2}{dy} + \frac{dP_3}{dx}, \\ Y_p &= \frac{dQ_1}{dz} + \frac{dQ_2}{dy} + \frac{dQ_3}{dx}, \\ Z_p &= \frac{dR_1}{dz} + \frac{dR_2}{dy} + \frac{dR_3}{dx}, \end{aligned} \right\} (3)$$

en supprimant le facteur  $\lambda$  commun à tous leurs termes.

Elles sont, comme on voit, les mêmes que si l'on eût supposé les dimensions du parallélépipède infiniment petites; hypothèse qui n'aurait pu convenir à un corps formé de molécules qui ne sont pas contiguës. Il est même nécessaire que ces dimensions soient de très-grands multiples du rayon d'activité des molécules, afin que l'on puisse négliger, par rapport à l'action entière du corps sur chaque face, la partie qui

Figura 26: Fragment d'un treball de Poisson<sup>31</sup> 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 això, la contribució fonamental per la que Poisson és conegut avui dia en l'anàlisi estructural, és el reconeixement, per primera vegada, de l'efecte de contracció lateral associat a

l'elongació longitudinal (l'anomenat *efecte Poisson*<sup>\*</sup>). Més tard, Poisson va aplicar les equacions de la teoria de l'elasticitat a diverses tipologies estructurals: plaques rectangulars i circulars, amb diverses condicions de contorn, sota càrregues estàtiques i dinàmiques, peces prismàtiques a torsió etc.

La contribució de Poisson a l'anàlisi estructural, no fou tant en termes del 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*<sup>34</sup>, publicat al 1811.

## NAVIER

Louis Marie Henri Navier, de qui ja se'n ha fet una ressenya històrica<sup>†</sup>, fou el prototip d'enginyer científic, tant interessat en els aspectes teòrics de l'enginyeria com en les seves vessants més aplicades.

Navier, va exercir una 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 el següent centenar d'anys. Precisament, el seguiment de

---

\* 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 38



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

390

MÉMOIRE

manière dans le n° 3. De plus, nommons  $l, m, n$  les angles que le plan tangent à la surface dans le point dont les coordonnées sont  $a', b', c'$  forme avec les plans des  $bc$ , des  $ac$  et des  $ab$ : on pourra remplacer, dans les termes qui se rapportent aux points de la surface,  $db' dc'$  par  $ds \cos. l$ ,  $da' dc'$  par  $ds \cos. m$ , et  $da' db'$  par  $ds \cos. n$  (voyez la *Mécanique analytique*, t. I, p. 205). Ces termes fourniront donc les équations déterminées

$$\begin{aligned} X' &= \varepsilon \left[ \cos. l \left( 3 \frac{dx'}{da'} + \frac{dy'}{db'} + \frac{dz'}{dc'} \right) + \cos. m \left( \frac{dx'}{db'} + \frac{dy'}{da'} \right) + \cos. n \left( \frac{dx'}{dc'} + \frac{dz'}{da'} \right) \right], \\ Y' &= \varepsilon \left[ \cos. l \left( \frac{dx'}{db'} + \frac{dy'}{da'} \right) + \cos. m \left( \frac{dx'}{da'} + 3 \frac{dy'}{db'} + \frac{dz'}{dc'} \right) + \cos. n \left( \frac{dy'}{dc'} + \frac{dz'}{db'} \right) \right], \\ Z' &= \varepsilon \left[ \cos. l \left( \frac{dx'}{dc'} + \frac{dz'}{da'} \right) + \cos. m \left( \frac{dy'}{dc'} + \frac{dz'}{db'} \right) + \cos. n \left( \frac{dx'}{da'} + \frac{dy'}{db'} + 3 \frac{dz'}{dc'} \right) \right], \end{aligned}$$

qui donnent les valeurs des forces qui doivent être appliquées aux points de la surface du corps, ou des efforts exercés sur les obstacles qui retiendraient fixes ces points. Les seconds membres doivent être affectés du signe — pour les points relatifs à la première limite de ce corps, et pris positivement pour les points relatifs à la limite opposée.

Les équations précédentes contiennent, sous la forme différentielle, tout ce qu'il est possible d'énoncer d'une manière générale sur les conditions de l'équilibre d'un corps solide élastique. Pour faire de nouveaux pas dans la recherche de cet

Figura 27: Fragment d'un treball de Navier<sup>31</sup> sobre les equacions d'equilibri en un medi elàstic.

En el camp de la teoria de l'elasticitat va a desenvolupar la teoria de les forces moleculars, que fou continuada després per Poisson i Cauchy, arribant a equacions d'equilibri (vegeu la Figura 27) que ja feien intuir les que després consolidaria Cauchy.

Ja en el camp de l'anàlisi d'estructures, tot i que va començar assumint alguns dels errors de Mariotte i Bernouilli sobre la posició de la fibra neutra en peces prismàtiques a flexió, Navier va rectificar ben aviat, incorporant la hipòtesi de deformació plana de la secció transversal que avui dia anomenen *Hipòtesi de Navier*. Més tard, aplicaria les seves teories a la determinació, correcta, de les càrregues últimes de bigues elàstiques a flexió, determinació de l'equació de la línia elàstica, i estudis de plaques a flexió. Navier fou, ben presumiblement<sup>40, 41</sup>, 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.

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



Jean Victor Poncelet

tensions admissibles del material per a tenir en compte les accions dinàmiques.

## CAUCHY

Com ja s'ha dit més 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 seus desenvolupaments.

196            SUR LES ÉQUATIONS QUI EXPRIMENT

être représentées, en conséquence, par les quantités

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

Soient d'ailleurs  $\varphi$  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 (\*),

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

Figura 28: Un dels primers treballs de Cauchy<sup>7</sup> mostrant les equacions que porten el seu nom.

---

\* Vegeu la pàgina 37.

Fou un treball preliminar de Navier, presentat a l'Acadèmia de Ciències, sobre la teoria de l'elasticitat, el que el va atreure en veure-hi les possibilitats que oferien els seus coneixements matemàtics en la disciplina que s'encetava. Partint de la *teoria de 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 treballs previs en hidrodinàmica<sup>40</sup>. Implícitament, postula el caràcter tensorial (independent del sistema de coordenades) de la nova magnitud, i sorgeix l'aportació fonamental de Cauchy a la mecànica de medis continus: el *tensor de tensions de Cauchy*.

Reescriu 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 28). Les aportacions posteriors de Cauchy a la teoria de l'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 angulars<sup>40</sup>, obtenció de les relacions entre tensions i deformacions per a un medi elàstic isotropi<sup>\*</sup>, solucions de la teoria de l'elasticitat per a diversos problemes de l'anàlisi estructural... i un llarg etcètera.

## LAMÉ

Gabriel Lamé (1795-1870) és 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 Escola d'Enginyeria de Sant Peteresburg, 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 són d'estranyar, doncs, les nombroses incursions i contribucions de Lamé en l'anàlisi estructural. En particular, és molt conegut el seu llibre<sup>26</sup> *Leçons sur la Théorie Mathématique de l'Elasticité des Corps Solides*.

Entre moltes d'altres aportacions a la Teoria de l'Elasticitat hi trobem les anomenades *constants de Lamé*, que caracteritzen les propietats mecàniques d'un material elàstic lineal isòtrop, l'anomenat *el·lipsoide de tensions de Lamé*, figura geomètrica que caracteritza l'estat tensional en un punt del medi elàstic. A nivell de l'enginyeria estructural són 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 l'enginyeria, com és ara l'enginyeria hidràulica; però,

---

\* vegeu la pàgina 43.

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

---

---

## VINGT ET UNIÈME LEÇON.

Mécanique moléculaire. — Élasticité des corps solides. — Pressions ou tensions intérieures. — Leurs relations entre elles et avec les forces extérieures. — Dilatations et glissements dans les corps. — Leurs relations pour les d'entre eux (\*).

---

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 quatrièmes années (1817-1829) des *Exercices de Mathématiques*, mais encore dans les autres œuvres de notre illustre maître, et aussi dans ses 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 pas les applications que Cauchy en a faites (*Exercices*, troisième et quatrième années) à la théorie 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*, no février 1827, t. XXVIII, p. 329) 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 critiques par M. Kirchhoff, Pénultime professeur de Heidelberg (*Ueber das Gleichgewicht und Bewegung eines elastischen Stabes*, t. LXI, de *Journal de Crelle*, p. 299).

Figura 29: Primera pàgina d'un treball de Saint Venant sobre la teoria de l'elasticitat.

El famós *principi de Saint Venant*, que permet substituir les forces superficials sobre un medi elàstic, pel seu equivalent

estàtic, és l'ingredient fonamental pel concepte d'esforç (o de tensió generalitzada) com a element fonamental de l'anàlisi estructural dels nostres dies. També es deu a 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 dels materials, duts a terme als darrers 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 les seves aportacions es troben en la seva edició del llibre de Navier<sup>30</sup> sobre Resistència de Materials, on les seves notes al marge constitueixen més del 90% del total<sup>40</sup>.

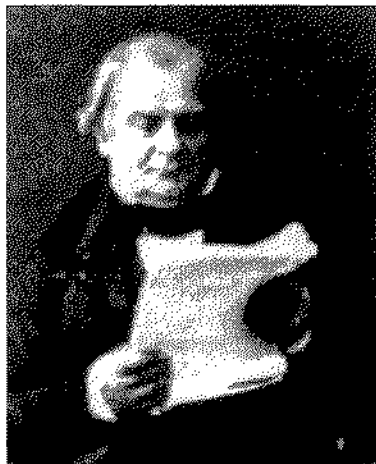
## CLAPEYRON

Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864) és considerat com un dels fundadors de la ciència de la termodinàmica. Tot i això, i en l'esperit de recerca multidisciplinària que caracteritzava els enginyers sortits de l'École Polytechnique, va contribuir a molts avenços en l'àmbit de l'anàlisi estructural.

---

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

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 l'Elasticitat.



Benoit Emile Clapeyron

Aportacions molt específiques de Clapeyron a l'anàlisi estructural són els procediments de càlcul de bigues contínues i l'anomenat *Teorema de Clapeyron* sobre l'energia elàstica de les estructures. Quan va tornar a França, després de la seva estada a Rússia, 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 se sintetitza en la Taula 7. 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 hiperestàtiques



NOM	DATES	OBRES MÉS 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</i> de Bélidor (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 mémoire 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 hiperestàtic - 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 - <i>Œuvres complètes</i> (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 LAME	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>Ellipsoïde 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 <i>Resumé des leçons de mécanique</i> 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 intérieur 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 7: 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<sup>31</sup>, bigues contínues (Clapeyron), plaques (Poisson, Cauchy), làmines<sup>31</sup> 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 d'equilibri del medi elàstic.
- Es formula, en gairebé la seva totalitat, la *teoria de l'elasticitat isotròpica* que utilitzem actualment. Cauchy introdueix el concepte revolucionari de tensió i formalitza el de deformació. Amb ells, obté 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 exacta (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 regulats 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, en 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 *Mecànica de Medis Continus i Teoria*

*d'Estructures*. Així fonamentada, l'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 de l'ordinador digital, en el darrer terç del segle passat, va requerir una revisió d'aquelles bases teòriques per adequar-les als anomenats *mètodes numèrics d'anàlisi estructural*<sup>32</sup>.

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<sup>40, 41</sup>. Però no es pot discutir que la part més important, i determinant, dels desenvolupaments de l'anàlisi estructural es dugué a terme a l'École Polytechnique durant els primers anys de la seva història.

És 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: l'enginyeria civil, en general, l'enginyeria mecànica, l'enginyeria de materials, l'enginyeria química, l'enginyeria elèctrica, l'enginyeria de mines... i tantes d'altres branques de l'enginyeria, troben moltes de les arrels històriques del seu desenvolupament científic en la primitiva École Polytechnique.

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

La innovadora visió del futur de l'enginyeria i l'obstinació dels seus impulsors en fer-lo realitat, ho van permetre....



## V.- CLOENDA

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

L'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 als nostres dies. No ha estat fins ara mateix que aquest paradigma s'ha qüestionat; amb una tendència a modificar-lo envers un model d'ensenyament d'inspiració més anglosaxona a on, tradicionalment, l'ensenyament de les ciències fonamentals a l'enginyeria ha estat més secundari... tant de bo que sigui a fi de bé!

En qualsevol cas l'empremta de l'École Polytechnique ja és indeleble. La Ciència és avui present a l'Enginyeria i l'Enginyeria també ha esdevingut una Ciència.

Aquest treball ha 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,  
per crear i per construir...  
en resum: la passió per la Ciència i la passió per  
l'Enginyeria...

... aquest és el seu llegat !

Moltes gràcies per la seva atenció.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- 1 Biography in Dictionary of Scientific Biography, 1970-1990, Ed. New York, 1970-1990.
- 2 Ballarini R. *The Da Vinci- Euler Bernouilli 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 Bernouilli 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 (prefàce 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/historique/histoire\\_ecole.htm](http://www.enpc.fr/fr/enpc/historique/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 invenienda 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](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 strength of materials*. New York, (USA): Dover Publications 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

### DEMOSTRACIÓ DE LA LLEI DE LA PALANCA (EQUILIBRI DE MOMENTS) EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU

*SAGREDO : ... mentre Simplicí i jo us esperàvem estàvem recordant la darrera consideració que vàreu establir com a principi i base pels resultats que intentàveu demostrar. Aquesta consideració tractava sobre la resistència que els sòlids oferien a la fractura que depenia d'un cert ciment que mantenia unides les dues parts, de manera que elles només es podien separar sota una considerable tracció<sup>\*</sup>. Més tard intentàreu trobar una explicació a aquesta coherència en la quantitat de buit existent, el 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; tot i que aquesta resistència és molt forta en el cas d'un estirament<sup>†</sup> directe, es troba com a regla que és menor en el cas d'accions transversals<sup>‡</sup>. Per exemple, una barra de ferro o de vidre sostindrà un estirament horitzontal de mil lliures, mentre un pes*

---

<sup>\*</sup> potente atrazione en l'original

<sup>†</sup> referint-se a la tracció

<sup>‡</sup> referint-se a la flexió

*de cinquanta lliures serà suficient per a trencar-la si la barra està convenientment subjecte en angle recte entre dues parets verticals. És 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 és a la resistència que fa, de manera inversament proporcional a la raó de les distàncies del fulcre\* a la força i a la resistència, respectivament.*

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

*SIMPLICI: Això va ser demostrat per Aristòtil en la seva Mecànica...*

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

*SIMPLICI: Ja que això és 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 és millor apropar-nos al nostre tema d'una manera que és una*

---

\* punt de suport

† *Works of Archimedes*. Trans. by T.L. Heath, pp. 189-220

mica diferent de l'emprada per Arquímedes, per exemple, suposant que pesos iguals posats en una balança de braços iguals produiran equilibri, un principi també acceptat per Arquímedes, i després provar que no és 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'altre, 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. És 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.

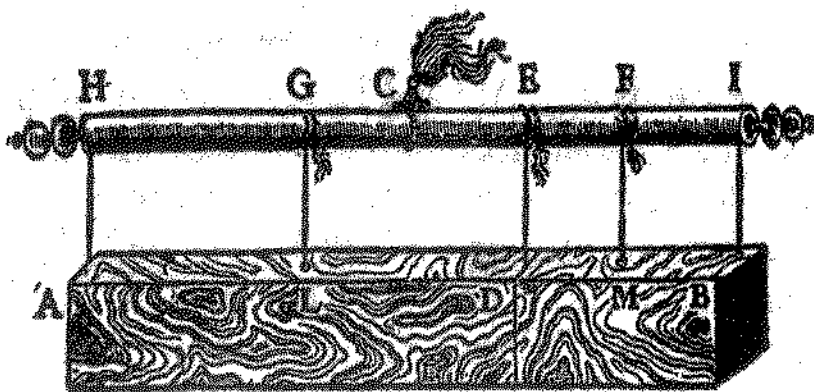


Fig. 14

\* balança

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 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 què 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 estès 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 es dona el mateix equilibri que quan la suspensió es al punt  $C$ . Ara considerem que tenim dos cossos pesats  $AD$  i  $DB$  penjant a l'extrem  $G$  i  $F$ , d'una balança  $GF$  en equilibri al voltant del punt  $C$ , de manera que la distància  $CG$  es la distància de  $C$  al punt de suspensió del cos pesat  $AD$ , mentre que  $CF$  es la distància a la qual l'altre cos pesat està recolzat. Només queda per demostrar que aquestes distàncies son una respecte de l'altra en proporció inversa dels 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  $GE$  es la meitat de  $EH$ , i com que  $EF$  es 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  $EF$  estan en raó una a l'altre 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<sup>\*</sup> 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.

---

<sup>\*</sup> matèria ha de ser entès aquí com a massa

## ANNEX 2

### SOBRE LA RESISTÈNCIA DE PEÇES SOTMESES A TRACCIÓ EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU

*SALVIATI: .... per entendre-ho més clarament imaginem-nos un cilindre AB fet de fusta o un 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. És clar que, per gran que siguin la tenacitat i coherència\* entre les dues parts, ja que no són 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 més 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 més gran, el ciment que manté juntes les parts, es quelcom més que filaments i fibres; i malgrat això també pot ésser trencat mitjançant una forta estirada.*

*SIMPLICI: 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. Però com pot ser que una corda de cent colzes de llarg, feta de fibres de cànem que no son més llargues*

---

\* coherència ha de ser entès aquí com a resistència



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 i d'altres materials que no mostren una estructura filamentosa es mantenen juntes, i la raó per la que, si no m'equivoco, exhibeixen una tenacitat tan gran.

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

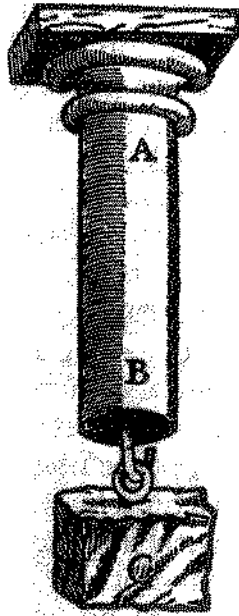


Fig. 1



Fig. 3

## ANNEX 3

### SOBRE LA RESISTÈNCIA DE PECES SOTMESES A FLEXIÓ I DE MÈNSULES EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU

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

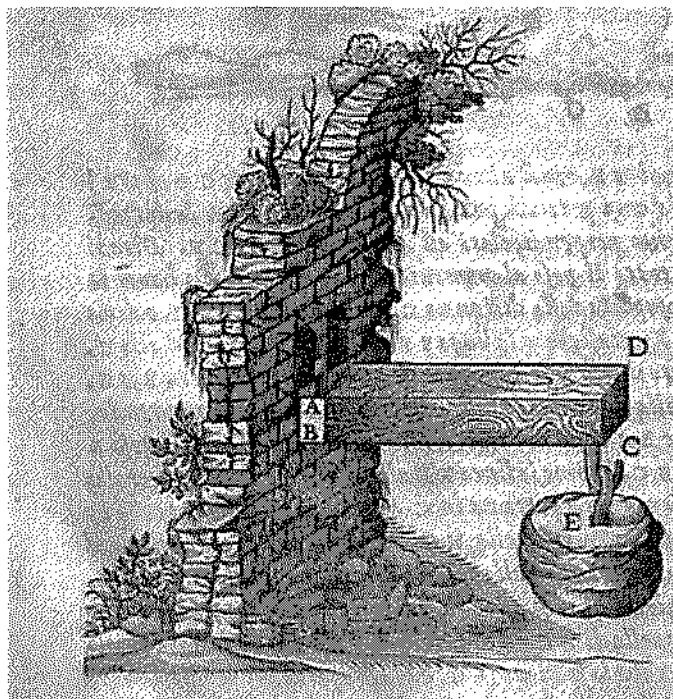
#### *Proposició I:*

*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 més 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 i que el prisma o cilindre forma un angle recte amb la paret. Es clar que, si el cilindre es trenca, la fractura oorrerà al punt B on la vora de la paret actua com un fulcre per la palanca BC, a la que la força és aplicada.*

*El gruix del sòlid BA és 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, de la part a dins de la paret mateixa. D'això se'n desprèn que la magnitud de la*

*resistència\** a la força aplicada a *C* és 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 contigua (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 actua en la mateixa direcció en la que es mou el cos) aleshores l'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 semidiàmetre 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, més 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 és de deu lliures, hem de tractar el pes E com d'onze lliures.

*SIMPLICI: I perquè no dotze lliures?*

*SALVIATI: El pes E, benvolgut 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 més prop de l'extrem B son menys efectives que aquelles que hi son més 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 l'extrem 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 a més, 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 més aviat un prisma, amb una amplada més gran que el seu gruix ofereix més resistència a la fractura quan una força hi és 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 l'amplada és 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 més petit que T?

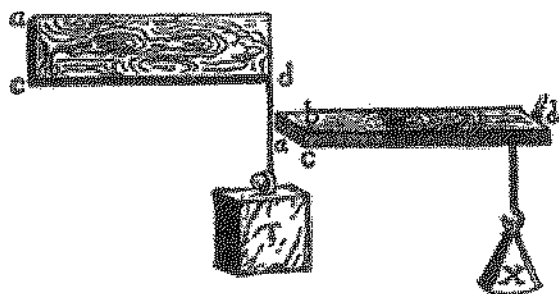


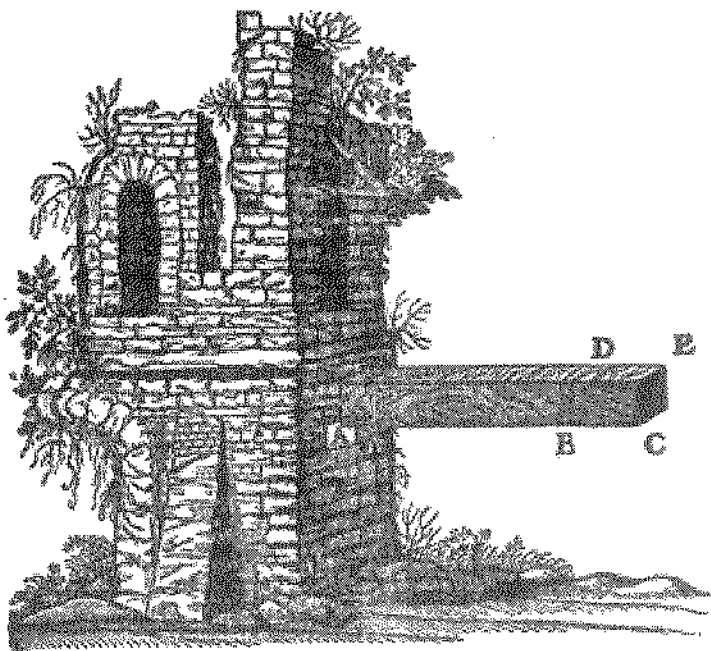
Fig. 18

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 distància 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- és més gran que en l'altre cas, on és solament la meitat de bc. Per tant, el pes T es més gran que el pes X en la mateixa proporció que la meitat del ample ca és 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 més gran resistència quan es 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 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 a llargada del prisma mitjançant l'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 és 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 és el producte d'aquests dos, augmenta en una proporció que és el quadrat de la proporció anterior. La conclusió es, aleshores, que els moments, deguts al pes dels prismes que tenen el mateix gruix, però diferents longituds, estan l'un amb l'altre en una relació que es el quadrat de la raó de les seves longituds o, el que es el mateix, la raó dels quadrats de les seves longituds...





DISCURS DE CONTESTACIÓ  
PER L'ACADÈMIC NUMERARI

EXCM. SR. DR. JOSEP PLA I CARRERA



Excel·lentíssim Senyor President de l'Acadèmia,  
Excel·lentíssims Senyores i Senyors Acadèmics,  
Senyores i Senyors,

M'honora donar la benvinguda a la Reial Acadèmia de Doctors al nou Acadèmic Dr. Xavier Oliver i Olivella. M'honora per la confiança que la Reial Acadèmia diposita en mi en aquest acte solemne, m'honora perquè l'acadèmic Dr. Eugenio Oñate m'ha apadrinat amb el convenciment que la meua contestació contribuirà a mantenir el caliu d'aquest acte simbòlic i iniciàtic, m'honora per la vàlua humana i intel·lectual del nou Acadèmic, el Dr. Oliver i, finalment, m'honora per la qualitat del Discurs d'ingrés. N'acabem d'escoltar una síntesi, però en recamano una lectura atenta.

Quan el Dr. Eugenio Oñate em va suggerir la possibilitat de fer el discurs de contestació i em va indicar que una de les qüestions que tractaria el Dr. Oliver era el naixement de l'École Polytechnique de París, vaig sentir d'immediat aromes de primavera i de joventut. Eren flaires, també provinents de París, d'aquell mes de maig del seixanta-vuit, quan alguns dels presents tot just havíem acabat els estudis, d'altres encara estudiàvem, i uns quants estàvem a punt d'entrar a la Universitat. Influïts, entre d'altres, per l'existencialisme de Jean-Paul Sartre i les disputes amb Albert Camus, amb les seves reflexions incisives sobre la condició humana, amb aproximacions a l'agnosticisme i a l'ateisme, per la lectura, des d'una visió cristiana, de la literatura del segle XX amb Charles Moeller, pel personalisme d'Emmanuel Mounier, tota una filosofia de pensar i de viure, avui ben oblidada, havíem descobert, amb el poeta, que ens agradaria allunyar-nos "nort enllà/on diuen que la gent és neta/i noble, culta, rica, lliure,/desvetllada, i feliç!". Submergits en la foscor dels temps que vivíem, crèiem fermament

en el Renaixement d'Europa com "una denominació d'origen". Durant molts anys hem esperat que allò que era un anhel, un projecte, un desig, esdevingués una realitat prou potent en els àmbits de la política, de la cultura, de la ciència, de l'organització social i jurídica, de l'humanisme, del respecte per les ètnies, els pobles i les llengües, quelcom, tot plegat, que, encara avui, se'ns mostra massa lent i confús.

Per aquesta flaire que arriba dels records, sempre mediatitzats, el fet de poder participar activament, com ho faig, en aquest acte, ja m'omple d'orgull i satisfacció.

Però en conèixer el Dr. Oliver, afabilitat, bonhomia, vivesa intel·lectual, passió juvenívola pel coneixement—com hem pogut veure i escoltar—i una certa joia en l'actitud vital, la participació se'm fa més plaent.

El Dr. Xavier Oliver i Olivella va néixer a Sant Sadurní d'Anoia, el 7 de juny de 1952. Estudià la carrera d'Enginyer de Camins Canals i Ports, que va acabar, l'any 1976, a l'Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de València. El títol de Dr. Enginyer de Camins, Canals, i Ports per la Universitat Politècnica de Catalunya, l'aconseguí l'any 1982, amb una tesi en enginyeria estructural, dirigida pel Dr. Enrique Oñate, membre d'aquesta Acadèmia.

D'aleshores ençà ha desenvolupat la recerca en camps d'enginyeria estructural, tot adaptant-la a les tècniques més actuals que proporciona la incorporació de la informàtica, quelcom que li ha permès d'especialitzar-se també en "Mecànica computacional de sòlids i estructures" i en "Mecànica computacional de materials".

Fruit d'aquestes recerques són els dos-cents i escaig treballs, entre llibres, capítols de llibres, ponències en congressos, monografies, apunts docents, i més de seixanta articles en

revistes especialitzades capdavanteres per la qualitat dels continguts.

En l'àmbit docent ha desenvolupat l'activitat, sobretot, a la Universitat Politècnica de Catalunya, de la qual és, des del 1989, catedràtic de "Mecànica de medis continus i Teoria d'estructures". Aquesta tasca docent, tanmateix, l'ha compartida amb estades a la University of Stanford i a la University of Colorado at Boulder (USA).

En ell destaca, però, una gran capacitat de col·laboració en activitats científiques—en ocasions, poc reconegudes—com ara organització de congressos, pertinença a comitès editorials de revistes científiques, activitats assessores en Consells consultius, direcció de grups de recerca, conferències plenàries en Congressos Inter-nacionals i participació en la gestió de la Universitat en càrrecs electes d'entre els quals cal destacar el de sotsdirector de l'Escola (1994-1996) de la qual és docent.

No em sembla que valgui la pena insistir més en la vàlua del Dr. Xavier Oliver i Olivella, però no voldria deixar d'esmentar una activitat molt vinculada, crec, amb l'essència de l'Acadèmia de doctors: la seva generositat i capacitat per dirigir tesis doctorals (14 en total, amb una mitjana de dues tesis per any des que és doctor). Tots aquests fets posen en relleu a bastament la seva qualitat humana i científica, tant personal com col·lectiva.

Ara, per acabar, em voldria fixar en el discurs d'ingrés, exposat, tots en sou testimonis, de forma precisa, lúcida, rigorosa i, molt important, amb una gran claredat didàctica, perquè, com deia Alexandre Galí, plagiant Edourad Claperède, "solament qui té les idees clares les pot expressar amb claredat".

No em referiré, però, a allò que ha exposat de forma explícita. Difícilment hi podria afegir res de nou i original.

Em fixaré en tres o quatre qüestions que, de forma subliminal, m'han despertat l'atenció i de què, penso, val la pena fer esment. Em portaran a plantejar preguntes que no tindran resposta ara i aquí, perquè les respostes—com el vi, si volem que tingui qualitat—necessiten silenci, repòs, i una temperatura fixa, allunyada dels acaloraments que produeixen els debats massa apassionats. De fet, les preguntes pretenen ser solament apunts d'una possible reflexió més profunda, però peremptòria i necessària.

1) Les primeres derivarien del convenciment de la importància del coneixement històric per a la comprensió, en profunditat, de l'evolució del pensament humà. Crec sincerament que, també en la ciència, hi ha un acte cultural—entenció de la cultura com "l'efecte de cultivar"—i, que en el nostre cas, com a acadèmics, és el cultiu del progrés de les idees i la connotació històrica en la qual es produeixen. Aquest component cultural és el que permet de preguntar-nos si "aquell esperit de l'École polytechnique" encara perdura, o bé si ha estat suplantat per un esperit nou, i d'analitzar la conveniència de retornar-hi, o no.

És un debat en el qual institucions com la Reial Acadèmia de Doctors, que avui realitza aquest acte solemne d'ingrés d'un acadèmic, hi hauria de participar de forma activa. En moments com l'actual, en què Europa, a través del Projecte de Bolonya, es planteja el futur dels ensenyaments universitaris, hi ha un espai molt ampli per a la reflexió de moltes de les qüestions subjacentes en la Conferència d'en Xavier. Per exemple, la que fa referència a la selecció dels estudiants per la capacitat, amb independència de les seves possibilitats econòmiques (amb el benentès que, abans d'arribar a la Universitat, cal haver fet possible la igualtat d'oportunitats, quelcom realment difícil en una societat com la nostra, molt complexa). Plana, també, de bell nou, la qüestió, que es plantejaren ja els ideòlegs de la Revolució francesa: la dicotomia llibertat/igualtat en les qüestions relacionades amb l'aprenentatge. Cal preguntar-se, doncs, fins a on hem d'assolir els graus d'igualtat,

per no caure en la uniformitat, quelcom que conculcaria, "de facto", l'acte de la llibertat individual?

2) El segon grup de preguntes tindria a veure amb l'habilitat per dur a terme projectes "progressites", com fou l'École Polytechnique de París. Aquest fet, a la llarga, afavoreix el que avui anomenem "la societat del benestar", perquè la tasca realitzada perdura en el temps, fins i tot, quan la influència de la institució decreix.

El Dr. Oliver ens ha parlat de prohoms d'una època concreta i en relació amb una qüestió concreta, però la grandesa i l'activitat de l'École Polytechnique la retrobem encara avui en dos dels set problemes del mil·lenni de la Fundació Clay, establerts públicament el mes de maig del 2000. Un en concret, el "problema de Navier-Stokes", està, a més, vinculat amb un dels protagonistes del nucli dur de l'exposició que hem escoltat suara, si bé fa referència a les matemàtiques dels fluids.

Un altre—resolt recentment—"la conjectura de Poincaré" és un repte plantejat per un "ancien élève de l'École Polytechnique" i, de fet, de l'École des mines: Henri Poincaré [1854-1912]—eminent i prestigiós matemàtic francès, considerat el darrer matemàtic global, en el sentit que sabia tot el que era rellevant a l'època (en matemàtica i física)—en acceptar de resoldre el repte del rei Òscar II de Suècia: "Els sistema solar és estable?", va trobar el caos. En síntesi, la impossibilitat de conèixer els esdeveniments futurs, de poder predir-los, ja que variacions molt petites, gairebé indistingibles, dels valors inicials, produeixen situacions ben allunyades. Com diu David Jou: "Els sistemes caòtics són aquells la dinàmica dels quals és molt irregular i sensible a les condicions inicials" (Jou, D. (2006). *El laberint del temps, la simfonia de la matèria*, p.38. Barcelona: Viena Edicions). És el que succeeix, per exemple, amb el pèndol. Tot va bé, i el pèndol pendula, si no ens apropem al punt superior. Però, si ens hi apropem gaire, una petita variació pot fer que el pèndol

segueixi pendulant o que, en canvi, faci una giravolta i es giri de l'altre costat. Aquest descobriment—que incia tot un món de complexitat en la matemàtica i la física—té lligams molt íntims amb uns objectes nous—en el sentit que foren descoberts durant el segle XX—, "els fractals". Els fractals són objectes geomètrics—o conjuntistes, si ho preferiu—d'una complexitat (o d'una simplicitat, mirant'ho per l'altra banda) que es troben arreu: en les volves de neu, els pulmons, els núvols, algunes plantes,..., i han permès una lectura de certs fenòmens físics, mèdics i climàtics d'una riquesa i unes possibilitats sorprenents. Precisament, foren descoberts per Benoît Mandelbrot [1924- ], un altre "ancien élève".

Aquests matemàtics, Poincaré i Mandelbrot, són, a més, excel·lents escriptors, bons divulgadors, i molt polifacètics. Tenen una gran capacitat per fer preguntes i per suggerir respostes, més enllà del quefer científic estricte, una característica que comparteixen amb d'altres "anciens élèves". Podem explicar aquest virtuosisme per l'atenció que l'École Polytechnique confereix a certes disciplines d'humanitats, com ara la història o l'expressió escrita? Caldria reconfigurar aquesta concepció en els currículums dels ensenyaments científics i tècnics actuals?

3) Unes altres preguntes estarien relacionades amb l'esperit de l'École Polytechnique que, com exposa Oliver, amb una capacitat de síntesi envejable fou fonamentar l'aplicació de les artes de la construcció en la teoria físicomatemàtica, tot just descoberta. Avui dia, com podem constatar en tants i tants plans d'estudis, sembla talment que calgui introduir ensenyaments aplicats perquè permeten allunyar-se dels continguts de component marcadament teòric. La qüestió és: cal mantenir l'esperit de l'École Polytechnique? Cal abandonar-lo? Cal trobar una situació d'equilibri?

4) I, per acabar voldria fer encara una darrera reflexió que es troba també implícitament en el text que hem escoltat i que



toca, d'alguna manera, el sentit d'un dels ritus d'aquest acte iniciàtic: la promesa de l'acadèmic que entra a formar part de l'Acadèmia i que fa referència a la responsabilitat del científic en l'àmbit social—avui global, ahir molt més nacional.

Em servirà d'exemple paradigmàtic d'una situació que es repeteix una vegada i una altra, el contingut del llibre, que personalment vaig trobar decebedor, "Cara a cara amb la vida, la ment, i l'univers", llibre en què Eduard Punset, com a periodista i pensador, vol apropar científics de renom a qüestions epistemològiques, metafísiques, ontològiques, i àdhuc teològiques, que transcendeixen la seva activitat científica. I la resposta, d'un rere l'altre, és idèntica: jo faig això i només puc parlar d'això. Que lluny de l'esperit que inspirà aquell reguitzell de conferències, en les quals vaig tenir l'oportunitat de participar, sobre la "responsabilitat de l'acte científic", organitzat, a començaments dels anys se-tanta del segle XX, pel Dr. Emilio Garbayo Martínez, cate-dràtic de Matemàtiques de l'Escola Superior d'Enginyers de Camins de Barcelona i que sintetitzà, com a colofó, en el seu llibre "Control Ideológico de la invención matemática" (Barcelona, 1978). Que lluny també de l'esperit dels "anciens élèves" de l'École Polytechnique, com Poincaré, que en una conferència cèlebre es plantejà la naturalesa psicològica de la invenció matemàtica, conferència que va fer possible també un petit estudi sobre la mateixa qüestió per part de Jacques Hadamard [1865-1963], el qual l'any 1884 féu els exàmens d'ingrés a l'École Polytechnique i a l'École Normale Supérieure i que, havent assolit el primer lloc en ambdós exàmens, trià l'École Normale Supérieure.

Cal, ben certament, suavitzar els límits de la qüestió i plantejar-la en termes més personals. En un món globalitzat econòmicament, en el qual els problemes d'abastiment de re-cursos energètics—que propicien enfrontaments bèl·lics— es basen en un mal repartiment dels béns productius, sanitaris i educatius, on no hi ha un tracte d'igualtat entre les persones amb independència de color, sexe, religió, riquesa, la pregunta que cal fer-se és senzilla:

els científics i els humanistes, els acadèmics en síntesi, tenim espai per a l'opinió i per a la intervenció? I si no en tenim, l'hem de buscar com a part intrínseca del nostre compromís i responsabilitat? Hem d'in-cidir en la qüestió: cal una altra mena de globalització que no passi solament per l'acumulació de les riqueses del planeta per part de molt pocs?

Nosaltres, aquí reunits, pensem que la Reial Acadèmia de doctors a la qual pertanyem, i que avui admet El Dr. Oli-ver i Olivella, té responsabilitats d'aquesta mena. I així ho expressem en els versos del "Gaudeamus Igitur" que la coral canta: "Que creixi la veritat,/que floreixi la fraternitat/i la prosperitat de la pàtria" (que avui, amb la globalització, és el Món sencer). La qüestió, en tot cas, és: Com fer-ho? Cap a on cal dirigir els projectes de les nostres recerques? Com hem d'influir en les decisions polítiques?

La resposta és molt complexa. Però crec, molt sincerament, que el Dr. Xavier Oliver i Olivella podrà ajudar-nos, amb molta efectivitat, en aquesta reflexió que el seu Discurs suggereix i que els ideals de la Revolució Francesa—amb tants d'errors— i els de l'École Polytechnique de París—amb tants d'encerts—van saber copsar fa ben bé més de dos-cents anys.

Amic Xavier Oliver, en nom de la Reial Acadèmia de doctors et dono la benviguda tot esperant els fruits de la teva incorporació.

Benvingut!

A Barcelona, 19 de desembre de 2006

# ÍNDEX DE CONTINGUTS

<u>I. - INTRODUCCIÓ</u> .....	9
<u>II. - LA INSTITUCIÓ</u> .....	13
<u>ELS ORÍGENS</u> .....	14
<u>UNS NOUS ALUMNES</u> .....	16
<u>UN NOU ENSENYAMENT</u> .....	20
... I UNS NOUS LLIBRES DE TEXT.....	25
<u>L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE I EL PODER POLÍTIC: LA</u> <u>REFORMA NAPOLEÓNICA</u> .....	26
<u>III. - ALGUNS NOMS</u> .....	33
<u>LAGRANGE (1736-1813)</u> .....	33
<u>FOURIER (1768-1830)</u> .....	35
<u>CAUCHY (1789-1857)</u> .....	37
<u>NAVIER (1785-1836)</u> .....	38
<u>POISSON (1781-1840)</u> .....	40
<u>ARAGO (1786-1853)</u> .....	42
<u>SAINT- VENANT (1797-1886)</u> .....	43
<u>SOPHIE GERMAIN (1776-1831)</u> .....	45
<u>IV. - UN EXEMPLE PARADIGMÀTIC: L'ENGINYERIA</u> <u>ESTRUCTURAL</u> .....	47
<u>ANTECEDENTS HISTÒRICS</u> .....	47
<u>GALILEO GALILEI</u> .....	50
<u>ROBERT HOOKE</u> .....	55
<u>EDME MARIOTTE</u> .....	60
<u>JACOB BERNOUILLI</u> .....	64
<u>ANTOINE PARENT</u> .....	67
<u>LEONARD EULER</u> .....	68
... i un nou (vell) vinquí:.....	71
<u>LEONARDO DA VINCI</u> .....	71
<u>CHARLES AGUSTIN COULOMB</u> .....	73
<u>RESUM DE SITUACIÓ</u> .....	75
<u>L'ANÀLISI ESTRUCTURAL I L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE</u> .....	78
<u>POISSON</u> .....	78
<u>NAVIER</u> .....	80
<u>PONCELET</u> .....	82
<u>CAUCHY</u> .....	83

<u>LAMÉ</u> .....	84
<u>SAINTE-VEENANT</u> .....	85
<u>V. - CLOENDA</u> .....	93
<u>REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES</u> .....	95
<u>ANNEX 1</u> .....	99
<u>DEMOSTRACIÓ DE LA LLEI DE LA PALANCA (EQUILIBRI DE MOMENTS) EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU</u> .....	99
<u>ANNEX 2</u> .....	104
<u>SOBRE LA RESISTÈNCIA DE PECES SOTMESES A TRACCIÓ EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU</u> .....	104
<u>ANNEX 3</u> .....	106
<u>SOBRE LA RESISTÈNCIA DE PECES SOTMESES A FLEXIÓ I DE MÈNSULES EN EL DIÀLEG SOBRE DUES NOVES CIÈNCIES DE GALILEU</u> .....	106
<u>DISCURS DE CONTESTACIÓ</u> .....	113

## FIGURES

<u>Figura 1: Gravats sobre el setge de Siracusa</u> .....	10
<u>Figura 2: L'École Polytechnique de París</u> .....	16
<u>Figura 3: L'École Polytechnique a començaments del segle XIX</u> ....	20
<u>Figura 4: Gravats del Collège de Navarre, antiga entrada de l'École Polytechnique enderrocada al 1811, rue de la Montagne Sainte-Geneviève</u> .....	28
<u>Figura 5: Portada de l'obra <i>Description de l'Égypte</i></u> .....	31
<u>Figura 6: Piràmide de Saqqara (Egipte)</u> .....	47
<u>Figura 7: Aqueducte de Segovia</u> .....	48
<u>Figura 8: Interior del Panteó de Roma, pintat per Giovanni Paolo Panini</u> .....	49
<u>Figura 9: Portada de <i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i> (Galileu, 1638)</u> .....	51
<u>Figura 10: Estudi sobre la llei de la palanca (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i>, Galileu, 1638)</u> .....	52
<u>Figura 11: Estudi de peces a tracció (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i>, Galileu, 1638)</u> .....	53
<u>Figura 12: Estudi de ruptura de mènsoles (<i>Diàlegs sobre dues noves ciències</i>, Galileu 1638)</u> .....	54
<u>Figura 13: Carta de Robert Hooke a Robert Boyle</u> .....	56
<u>Figura 14: Esquema de l'estudi de propietats elàstiques a <i>De Potentia Restitutiva</i> (Robert Hooke, 1678)</u> .....	57
<u>Figura 15: Anagrama sobre les formes anti-funiculars (<i>Description of Helioscopes</i>, Robert Hooke, 1705)</u> .....	58
<u>Figura 16: Estudi de mecanismes flexibles i de flexió de bigues a <i>De potentia restitutiva</i> (Robert Hooke, 1678)</u> .....	59
<u>Figura 17: Assaigs científics de Edme Mariotte (1681)</u> .....	61
<u>Figura 18: Estudis sobre comportament a tracció i flexió de bigues de Edme Mariotte</u> .....	62

<u>Figura 19: Evolució de la distribució de l'esforç flector, <math>M</math>, sobre una secció de peça prismàtica a flexió: a) Galileo (1638) b) Mariotte (1670) c) Parent (1713)</u> .....	63
<u>Figura 20: Arbre genealògic de la família Bernoulli</u> .....	65
<u>Figura 21: Estudi de Jacob Bernoulli, a les Actes de l'Acadèmia de Ciències de París, sobre el comportament elàstic de bigues (1704)</u> .....	66
<u>Figura 22: Elogi de A. Parent a Història de l'Acadèmia de Ciències de París, de Fontanelle (1716)</u> .....	67
<u>Figura 23: Primera pàgina del treball d'Euler del 1728 sobre corbes elàstiques</u> .....	70
<u>Figura 24: Reproducció del foli 84 del Codi de Madrid (manuscrit original de Leonardo de Vinci) sobre la teoria de bigues</u> .....	72
<u>Figura 25: Dispositiu experimental de Coulomb per a la realització d'estudis sobre la torsió</u> .....	74
<u>Figura 26: Fragment d'un treball de Poisson sobre la teoria de forces moleculars en un medi elàstic</u> .....	79
<u>Figura 27: Fragment d'un treball de Navier sobre les equacions d'equilibri en un medi elàstic</u> .....	81
<u>Figura 28: Un dels primers treballs de Cauchy mostrant les equacions que porten el seu nom</u> .....	83
<u>Figura 29: Primera pàgina d'un treball de Saint-Venant sobre la teoria de l'elasticitat</u> .....	86

## TAULES

<u>Taula 1: Dades del nombre de candidats i d'acceptats en les primeres proves de selecció.....</u>	17
<u>Taula 2 : Dades de l'extracció social dels alumnes a l'any 1799.....</u>	18
<u>Taula 3 : Evolució de l'origen social dels politècnics .....</u>	19
<u>Taula 4 : Contingut de matèries del primer any d'estudis.....</u>	23
<u>Taula 5 : Contingut de matèries del segon any d'estudis.....</u>	24
<u>Taula 6: Evolució cronològica de la Mecànica Estructural abans de l'École Polytechnique: de Leonardo a Coulomb .....</u>	77
<u>Taula 7: Evolució cronològica de l'anàlisi estructural durant els primers anys de l'École Polytechnique: de Poisson a Clapeyron .....</u>	89

## NOVES PUBLICACIONS DE LA REIAL ACADEMIA DE DOCTORS

### *Directori 1991*

*Los tejidos tradicionales en las poblaciones pirenaicas* (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Eduardo de Aysa Satué, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1992.

*La tradición jurídica catalana* (Conferència magistral de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Joan Pintó i Ruiz, Doctor en Dret, en la Solemne Sessió d'Apertura de Curs 1992-1993, que fou presidida per SS.MM. el Rei Joan Carles I i la Reina Sofia) 1992.

*La identidad étnica* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 1993.

*Els laboratoris d'assaig i el mercat interior; Importància i nova concepció* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Simón i Tor, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

*Contribución al estudio de las Bacteriemias* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Miquel Mari i Tur, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Manuel Subirana i Cantarell, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1993.

*Realitat i futur del tractament de la hipertrofia benigna de pròstata* (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia i contestació per l'Excm. Sr. Albert Casellas i Condom, Doctor en Medicina i Cirurgia i President del Col·legi de Metges de Girona) 1994.

*La seguridad jurídica en nuestro tiempo. ¿Mito o realidad?* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1994.

*La transició demogràfica a Catalunya i a Balears* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ferrer i Bernard, Doctor en Psicologia) 1994.

*L'art d'ensenyar i d'aprendre* (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Agustín Luna Serrano, Doctor en Dret) 1995.

*Sessió necrològica* en record de l'Excm. Sr. Lluís Dolcet i Boxeres, Doctor en Medicina i Cirurgia i Degà-emèrit de la Reial Acadèmia de Doctors, que morí el 21 de gener de 1994. Enaltiren la seva personalitat els acadèmics de número Excms. Srs. Drs. Ricard Garcia i Vallès, Josep Ma. Simón i Tor i Albert Casellas i Condom. 1995.

*La Unió Europea com a creació del geni polític d'Europa* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jordi Garcia-Petit i Pàmies, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Llort i Bruill, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

*La explosión innovadora de los mercados financieros* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Emilió Soldevilla García, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm. Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret) 1995.



*La cultura com a part integrant de l'Olimpisme* (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Joan Antoni Samaranch i Torelló, Marquès de Samaranch, i contestació per l'Excm. Sr. Jaume Gil Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 1995.

*Medicina i Tecnologia en el context històric* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán) 1995.

*Els sòlids platònics* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Pilar Bayer i Isant, Doctora en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1996.

*La normalització en Bioquímica Clínica* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Xavier Fuentes i Arderiu, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Geografia) 1996.

*L'entropia en dos finals de segle* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques) 1996.

*Vida i música* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Carles Ballús i Pascual, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Espadaler i Medina, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1996.

*La diferencia entre los pueblos* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Sebastià Trias Mercant, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

*L'aventura del pensament teològic* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1996.

*El derecho del siglo XXI* (Discurs d'ingrés com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Dr. Rafael Caldera, President de Venezuela, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

*L'ordre dels sistemes desordenats* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Novell, Doctor en Arquitectura) 1997.

*Un clam per a l'ocupació* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Joan Bassegoda i Novell, Doctor en Arquitectura) 1997.

*Rosalía de Castro y Jacinto Verdaguer, visión comparada* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

*La nueva estrategia internacional para el desarrollo* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Santiago Ripol i Carulla, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

*El aura de los números* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'Excm. Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1998.

*Nova recerca en Ciències de la Salut a Catalunya* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia, i contestació per l'Excm. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

*Dilemes dinàmics en l'àmbit social* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Albert Biayna i Mulet, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

*Mercats i competència: efectes de liberalització i la desregulació sobre l'eficàcia econòmica i el benestar* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Amadeu Petitbó i Juan, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm. Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret) 1999.

*Epidèmias de asma en Barcelona por inhalaci3n de polvo de soja* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Ma. José Rodrigo Anoro, Doctora en Medicina, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Llorc i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1999.

*Hacia una evaluaci3n de la actividad cotidiana y su contexto: ¿Presente o futuro para la metodologí?* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) i contestació per l'Excm. Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Hist3ria) 1999.

#### *Directori 2000*

*Génesis de una teorí de la incertidumbre.* Acte d'imposici3 de la Gran Creu de l'Orde d'Alfons X el Savi a l'Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Financeres) 2000.

*Antonio de Capmany: el primer historiador moderno del Derecho Mercantil* (discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Xabier Añoveros Trias de Bes, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Santiago Dexeus i Trias de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2000.

*La medicina de la calidad de vida* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Luis Rojas Marcos, Doctor en Psicologia, i contestació per l'Excm. Sr. Àngel Aguirre Baztán, Doctor en psicologia) 2000.

*Pour une science touristique: la tourismologie* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il·lm. Sr. Jean-Michel Hoerner, Doctor en Lletres i President de la Universitat de Perpinyà, i contestació per l'Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 2000.

*Virus, virus entèrics, virus de l'hepatitis A* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Albert Bosch i Navarro, Doctor en Ciències Biol3giques, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2000.

*Mobilitat urbana, medi ambient i autom3bil. Un desafiament tecnol3gic permanent* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Pere de Esteban Altiriba, Doctor en Enginyeria Industrial, i contestació per l'Excm. Sr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

*El rei, el burgès i el cronista: una hist3ria barcelonina del segle XIII* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Hist3ria, i contestació per l'Excm. Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

*La informació, un concepte clau per a la ciència contemporània* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Salvador Alsius i Clavera, Doctor en Ciències de la Informació, i contestació per l'Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2001.

*La drogaaddicció com a procés psicobiològic* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Miquel Sánchez-Turet, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm. Sr. Pedro de Esteban Altitriba, Doctor en Enginyeria Industrial) 2001.

*Un univers turbulent* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jordi Isern i Vilaboy, Doctor en Física, i contestació per l'Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Psicologia) 2002.

*L'envelliment del cervell humà* (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm. Sr. Jordi Cervós i Navarro, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Pou d'Avilés, Doctor en Dret) 2002.

*Les telecomunicacions en la societat de la informació* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Àngel Cardama Aznar, Doctor en Enginyeria de Telecomunicacions, i contestació per l'Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2002.

*La veritat matemàtica* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Josep Pla i Carrera, doctor en Matemàtiques, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2003.

*L'humanisme essencial de l'arquitectura moderna* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Helio Piñón i Pallarés, Doctor en Arquitectura, i contestació per l'Excm. Sr. Xabier Añoveros Trías de Bes, Doctor en Dret) 2003.

*De l'economia política a l'economia constitucional* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Joan Francesc Corona i Ramon, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm. Sr. Xavier Iglesias i Guiu, Doctor en Medicina) 2003.

*Temperància i empatia, factors de pau* (Conferència dictada en el curs del cicle de la Cultura de la Pau per el Molt Honorable Senyor Jordi Pujol, President de la Generalitat de Catalunya, 2001) 2003.

*Reflexions sobre resistència bacteriana als antibiòtics* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Ma. de los Angeles Calvo i Torras, Doctora en Farmàcia i Veterinària, i contestació per l'Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2003.

*La transformació del negoci jurídic com a conseqüència de les noves tecnologies de la informació* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Rafael Mateu de Ros, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm. Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

*La gestió estratègica del immobilitzat* (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excm. Sra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm. Sr. Josep J. Pintó i Ruíz, Doctor en Dret.

*Los costes biológicos, sociales y económicos del envejecimiento cerebral* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Félix F. Cruz-Sánchez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm. Sr. Josep Pla i Carrera, Doctor en Matemàtiques) 2004.

*El conocimiento glaciar de Sierra Nevada. De la descripción ilustrada del siglo XVIII a la explicación científica actual.* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Antonio Gómez Ortiz, Doctor en Geografia, i contestació per l'acadèmica de número Excm. Sra. Maria Teresa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) 2004.

*Los beneficios de la consolidación fiscal: una comparativa internacional* (Discurs de recepció com a acadèmic d'Honor de l'Excm. Sr. Rodrigo de Rato y Figaredo, Director-Gerent del Fons Monetari Internacional. El seu padrí d'investidura és l'acadèmic de número Excm. Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret) 2004.

*Evolución histórica del trabajo de la mujer hasta nuestros días* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Eduardo Alemany Zaragoza, Doctor en Dret, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Rafel Orozco i Delclós, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2004.

*Geotecnia: una ciencia para el comportamiento del terreno* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Antonio Gens Solé, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2005.

*Sessió acadèmica a Perpinyà*, on actuen com a ponents; Excm. Sra. Anna Maria Gil Lafuente, Doctora en Ciències Econòmiques i Empresarials i Excm. Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials: "*Nouvelles perspectives de la recherche scientifique en économie et gestion*"; Excm. Sr. Rafel Orozco i Delclós, Doctor en Medicina i Cirurgia: "*L'impacte mèdic i social de les cèl·lules mare*"; Excm. Sra. Anna Maria Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia: "*Nouvelles strategies oncologiques*"; Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària: "*Les résistances bactériennes a les antibiotiques*". 2005.

*Los procesos de concentración empresarial en un mercado globalizado y la consideración del individuo* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Fernando Casado Juan, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació de l'Excm. Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 2005.

*"Son nou de flors els rams li renc"* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm. Sr. Jaume Vallcorba Plana, Doctor en Filosofia i Lletres (Secció Filologia Hispànica), i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Filosofia i Lletres) 2005.

*Historia de la anestesia quirúrgica y aportación española más relevante* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Vicente A. Gancedo Rodríguez, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Llort i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

*El amor y el desamor en las parejas de hoy* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Paulino Castells Cuixart, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Joan Trayter i Garcia, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

*El fenomen mundial de la deslocalització com a instrument de reestructuració empresarial* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Alfredo Rocafort i Nicolau, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresarials) 2006.

*Biomaterials per a dispositius implantables en l'organisme. Punt de trobada en la Historia de la Medicina i Cirurgia i de la Tecnologia dels Materials* (Discurs d'ingrés de l'acadèmic de número Excm. Sr. Josep Anton Planell i Estany, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'acadèmic de número Excm. Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2006.

La Reial Acadèmia, bo i respectant  
com a criteri d'autor les opinions  
exposades en les seves publicacions,  
no se'n fa responsable ni solidària.

© Reial Acadèmia de Doctors  
Impressió: Imprenta Baltasar 1861  
Tels. 93 346 91 52 - 93 346 92 06  
Tiratge 350 exemplars

Dipòsit Legal: B-55296-2006





REIAL ACADEMIA DE DOCTORS  
-Publicacions-