

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

De Gaudí a Miralles. Cent Anys d'Estructura Metàl·lica a Barcelona.



Autor: Josep Maria Pons Poblet

Directors: Frederic Marimon Carvajal
Josep Maria Fornons García

Tesi Doctoral presentada per a obtenir el títol de Doctor per la Universitat
Politécnica de Catalunya.

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria.

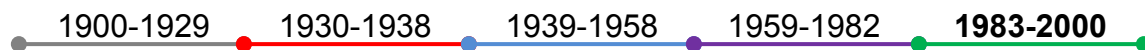
Programa de Doctorat en Anàlisi Estructural. Barcelona 2014.

BLOC V. 1983-2000



Plenes d'escombraries, les pedreres
són l'estrat més profund de les fonts lluminoses,
del parc d'atraccions on la nòria gira
com la melancolia: això és el passat,
són els dies perduts. I començo a estimar
-ara que és destruït- un temps que, quan va ser,
no vaig ni respectar. I estimo aquest record
que fa ressonar el vent entre els tirants d'acer
damunt la vela blanca desplegada a l'estadi.





5.1. CONTEXT HISTÒRIC	5
5.2. MÈTODES DE CàLCUL	12
5.2.1. Mètodes d'anàlisi global.....	13
5.2.1.1. Mètode matricial.....	15
5.2.1.2. Mètode dels elements finits.....	33
5.2.2. Mètodes de dimensionament de peces i unions.....	41
5.3. NORMATIVA OFICIAL	47
5.3.1. NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación.....	51
5.3.2. EUROCÓDIGO 3. Proyecto de Estructuras de Acero.	59
5.4. TECNOLOGIA INDUSTRIAL.....	69
5.4.1. Tecnologia dels materials	70
5.4.2. Tecnologia de fabricació i muntatge	76





5.1. CONTEXT HISTÒRIC

El període que ens ocupa (1983-2000), darrer del nostre estudi, el podríem generalitzar dient que ha estat el de la consolidació democràtica.

En aquests anys es van afermar les llibertats bàsiques, es va produir la normal alternança política, es va incidir fortament en la modernització general del país i es va acabar la construcció de l'Estat autonòmic¹.

Tal i com referia el paràgraf anterior han existit en aquest període alternances polítiques però, a nivell de l'Estat espanyol, es pot parlar de bipartidisme, si més no en referència al poder estatal. Dos partits han estat els que han manat durant aquesta etapa. Primerament el *Partido Socialista Obrero Español* (P.S.O.E.) que ho farà des de 1982 fins l'any 1996 essent rellevat pel Partido Popular (P.P.) que ocuparà el poder fins el 2004.



Figura 5.1 Portada de la victòria socialista. Font: La Vanguardia 29 d'octubre de 1982.

Sense un exhaustiu aprofundiment que sortiria lluny del nostre estudi podem dir que, a part de les dades abans citades, també podem trobar en aquest període reformes en el camp educatiu, sanitari, fiscals, en polítiques d'ocupació, entre d'altres, amb la missió principal de modernització de l'Estat espanyol.

¹ Crònica. Història. Autors: Agustí Alcoberro, Jesús Castillo, Jaume Cortada, Ernest Ferreres.

Amb aquesta finalitat es prengueren una sèrie de mesures, pels diferents governs, que motivà en nombroses ocasions protestes i descontentament social com la que provocà una vaga general el 14 de desembre de 1988.

Una data important en aquest període serà el **12 de juny de 1985** quan es firma el **Tractat d'Adhesió d'Espanya a la Comunitat Econòmica Europea** (C.E.E.) que es feu efectiva el primer dia de gener de 1996.

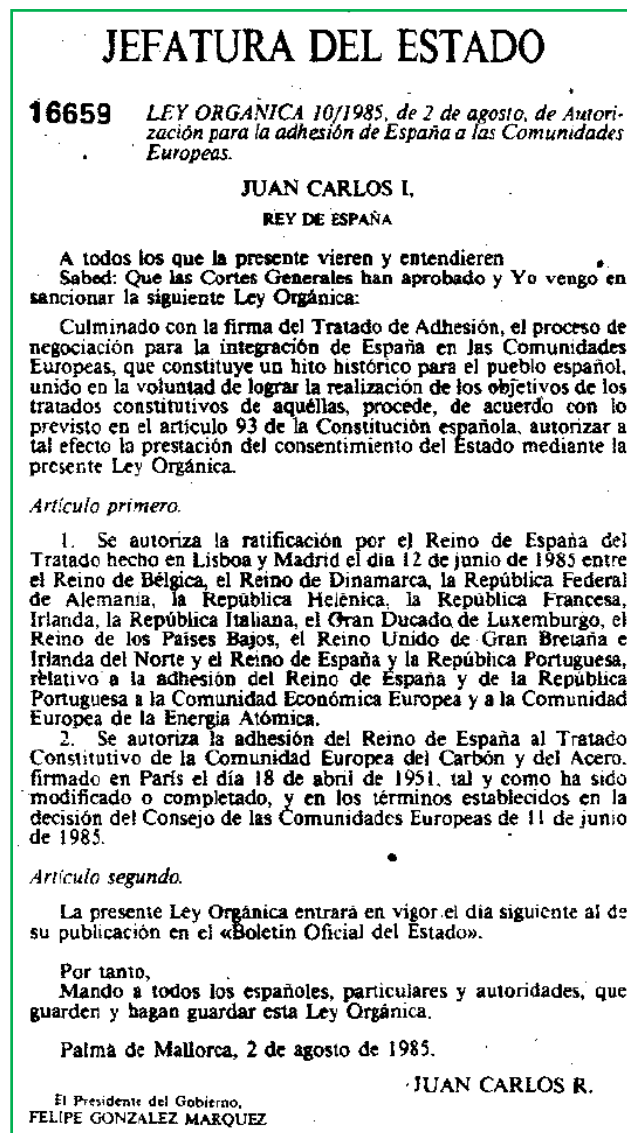


Figura 5.2 Adhesió d'Espanya a les Comunitats Europees².

² Publicado en: BOE núm. 189, de 8 de agosto de 1985, páginas 25119 a 25119.

Sección: I. Disposiciones generales

Departamento: Jefatura del Estado

Referencia: BOE-A-1985-16659

Podem dir que l'aïllament espanyol quedarà finalment acabat. Comença doncs una etapa en la qual, transitòriament, l'Estat espanyol s'integrarà definitivament a Europa. Evidentment fou un procés de reconversió que portà associat un canvi de formes i estructures vigents fins llavors. Aquest mercat únic va permetre un mercat interior sense fronteres per als països de la C.E.E.. La lliure circulació de persones, serveis, capitals i mercaderies era ja possible.

Un altre any clau serà l'any 1992 amb l'anomenat **Tractat de la Unió Europea de Maastricht**³ en el qual es fixa una política econòmica comuna i l'establiment de l'euro.



Figura 5.3 Unió Europea. Font: La Vanguardia 1 de novembre de 1993.

Per a l'entrada a la Unió Econòmica i Monetària es preveia:

- Una inflació que no excedeixi del 1,5 per cent de la mitjana dels tres països comunitaris amb menys inflació.
- Un tipus d'interès a mig i llarg termini que no excedeixi més del 2 per cent la mitjana dels mateixos països.

³ Tractat aprovat a Maastricht (Holanda) l'any 1992 que donà lloc a la Unió Europea i inicià la unió monetària entre els seus estats membres.

- Una moneda que hagi estat, almenys durant els dos darrers anys, a la banda estreta del S.M.E.⁴
- Un dèficit públic no superior al 3 per cent del PIB i un deute acumulat no inferior al 60 per cent del PIB.

Aquestes mesures no foren fàcils d'aconseguir i tal com abans es feia notar provocaren tot un seguit d'ajustos que causaren més d'una protesta social. A més cal tenir present que el context mundial estava canviant i potències com Xina i Índia començaven a emergir.

A Barcelona cal afegir un element que marcà profundament la ciutat; l'organització dels **Jocs Olímpics de l'any 1992**.



Figura 5.4 Barcelona és designada seu olímpica. Font: La Vanguardia 18 d'octubre de 1986.

⁴ Sistema Monetari Europeu.

Designada l'any 1986 com a ciutat Olímpica, Barcelona es preparà per a una importantíssima transformació urbanística a més d'una internacionalització de la mateixa. L'Ajuntament de Barcelona destaca,

A més de la construcció de la **Vila olímpica**, la celebració dels Jocs Olímpics del 1992 va articular una transformació d'abast metropolità, en bona part dissenyada anys abans, que va dotar la ciutat d'infraestructures logístiques, esportives, culturals i socials de primer ordre, com ara **l'ordenació del front marítim del Poblenou i de les platges, les rondes, l'ampliació de l'aeroport, la millora de la xarxa ferroviària amb la rehabilitació de l'Estació de França** i la supressió del tram de la costa fins al Besòs, l'impuls de l'arribada del tren d'alta velocitat, la **construcció de l'anella olímpica de Montjuïc** amb equipaments de primer nivell com el **Palau Sant Jordi**, la **renovació del Port Vell**, la **nova torre de telecomunicacions de Collserola** i la creació de nombrosos equipaments de ciutat, entre altres infraestructures⁵.



Figura 5.5 L'Anella Olímpica. Font: Arxiu Fotogràfic de Barcelona.

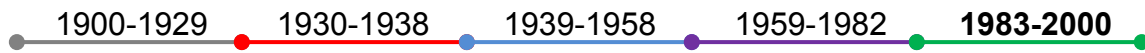
⁵ http://www.bcn.cat/historia/pag/capitols/cap_44/ca/capitol_44.htm

Paral·lelament a les grans obres olímpiques i de dotació d'infraestructures, la política de transformació dels barris de la ciutat va permetre que les actuacions de millora, gràcies a la xarxa descentralitzada de districtes, arribessin arreu de la ciutat⁶.



Figura 5.6 Recuperació front marítim Font: Ajuntament de Barcelona.

⁶ http://www.bcn.cat/historia/pag/capitols/cap_44/ca/capitol_44.htm



1983-2000	Mètode matricial
	Mètode dels elements finits

5.2. MÈTODES DE CÀLCUL

5.2.1. Mètodes d'anàlisi global

Tal i com ha anat passant al llarg del nostre estudi, la influent realitat social que s'estava vivint deixaria petjada en els mètode de càlcul que s'estaven implementant. El país, que ja es podia considerar europeu tal i com hem vist en l'apartat precedent, també rebia les influències tecnològiques que s'estaven produint tant a Europa com al món en general. L'electrònica i la informàtica eren dues realitats que cada vegada anaven prenent més cos i, evidentment, la seva influència seria transcendental. Els mètodes de càlcul vindran a confirmar a aquest fet.

Dir que apareixen, en aquest període, mètodes nous es creu que fora inexacte. Cert és, però, que puntualment se'n formulà algun o es perfeccionà algun dels existents. El que realment va succeir fou que la tecnologia permeté la resolució del problema -fins llavors inabastable- de manera molt més àgil i ràpida. Per exemple, en parlar del mètode de les slope deflection al BLOC III es remarcà molt que la dificultat no era la formulació de les equacions sinó la seva resolució. Perfectament el nombre d'incògnites i per tant d'equacions necessàries era tant elevat que l'estudi del problema es podia considerar inabordable. Amb la implementació dels anomenats **mètodes numèrics**, la problemàtica de la resolució del sistema quedava resolta, si més no era un problema de càlcul numèric perfectament resoluble amb mètodes informàtics que eren cada vegada a l'abast de més persones.

13

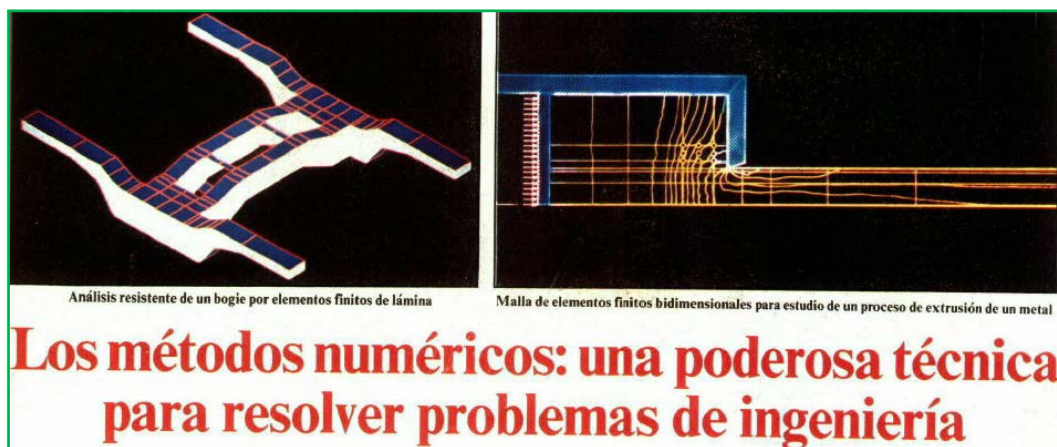


Figura 5.7 Font: La Vanguardia 19 d'abril de 1987.

Entrem doncs dins **l'època dels mètodes numèrics**. En destaca **el mètode dels elements finits** (M.E.F.) com a principal i **el mètode matricial** que, com veurem, es pot considerar un cas particular del mateix. Tot i això sovint, per la tipologia del problema estudiat en el món estructural, sovint es refereix abans dins la bibliografia al càlcul matricial que al propi M.E.F..

Serà doncs el primer que abordarem.

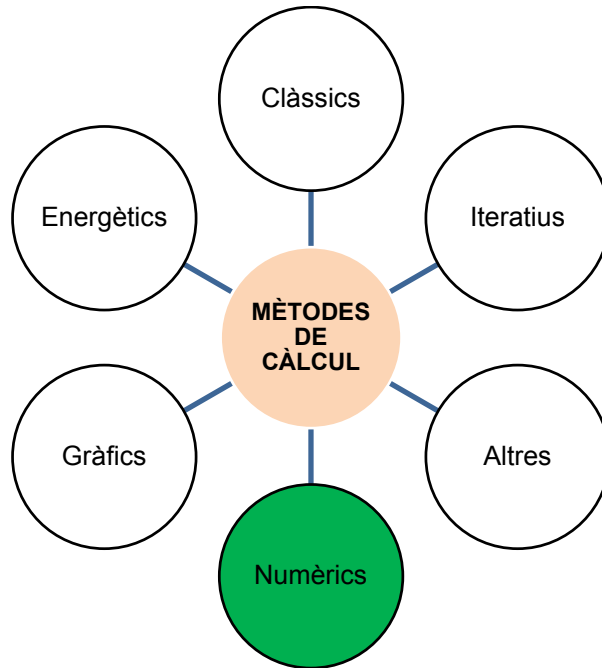
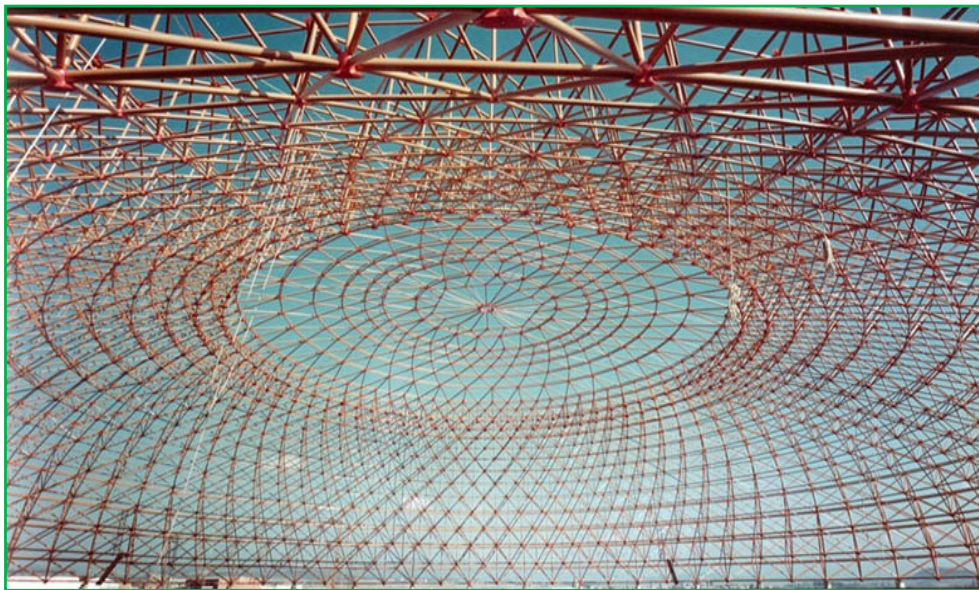


Figura 5.8 Mètodes de Càlcul. Mètodes Numèrics.



Aquesta arquitectura només és possible gràcies a complexos càlculs d'estructures, i els primers que en varem parlar a arquitectura a Espanya vam ser un servidor amb Carles Buxadé a principis dels anys 70. En aquells moments, **s'havien de fer 30 equacions amb d'altres tantes incògnites per fer un edifici**. Ara, són milions d'equacions i incògnites, que es resolten informàticament en molt poc temps. En aquests moments, **qualsevol es pot fer el seu caprici arquitectònic, per més estrambòtic que sigui**.

Joan Margarit

5.2.1.1. Mètode matricial

La mecanización del cálculo de estructuras reticulares es al mismo tiempo una realidad, un gran triunfo y una mayor promesa de la moderna ingeniería gracias a **la conjunción de las teorías clásicas del siglo XIX y de los computadores electrónicos nacidos en nuestros días**. Ningún ingeniero puede subestimar la trascendencia de este suceso⁷.

La complexitat matemàtica que a voltes acompanyava algun càlcul de la mecànica del medi continu feia que, en casos concrets, el seu estudi fos inabordable o bé la solució trobada fos bastant aproximada a la realitat.

Per exemple les conegudes equacions de Navier - Cauchy per la resolució del problema elàstic portaven associades una enorme dificultat de càlcul si es pretenia resoldre amb generalitat el problema plantejat.

$$(\lambda + G)\text{grad}(\text{div}\bar{u}) + G\Delta\bar{u} + \bar{b} = 0$$

Al voltant dels anys 70 la informàtica començà a irrompre amb força i serà per tant una nova eina molt útil a tenir en compte per implementar les equacions que no es podien resoldre (o de resolució molt tediosa) o bé formular nous mètodes adaptats especialment per a poder ser resolts amb mètodes anomenats computacionals. D'un article de l'època llegim,

16

El veto que pesaba sobre el Cálculo Matricial en Mecánica Elástica había desaparecido y nuevas perspectivas se abrieron en la ingeniería, que hoy dispone de métodos más cómodos, rápidos y seguros para efectuar el **cálculo de estructuras empleando un ordenador electrónico**⁸.

Joan Margarit i Carles Buxadé, al seu llibre *Cálculo matricial de estructuras de barras* també s'hi refereixen,

Éstos (en referència als computadores), han dado lugar a la aparición de un factor tecnológico que ha incidido con cierta violencia dentro del campo

⁷ Métodos matriciales para mecanizar el cálculo de estructuras. Federico Alicart 1969. Font: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1969/1969_tomol_3045_01.pdf

⁸ Ideas preliminares en torno a la mecanización del cálculo de estructuras. Federico Alicart 1968. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1968/1968_tomol_3039_04.pdf

estructural, provocando un cambio de rumbo comparable al que en su día causaron los primeros trabajos y sistematizaciones de un **Saliger**⁹ o de un **Kleinlogel**¹⁰ primero, o a la introducción del **método de Cross**¹¹ después¹².

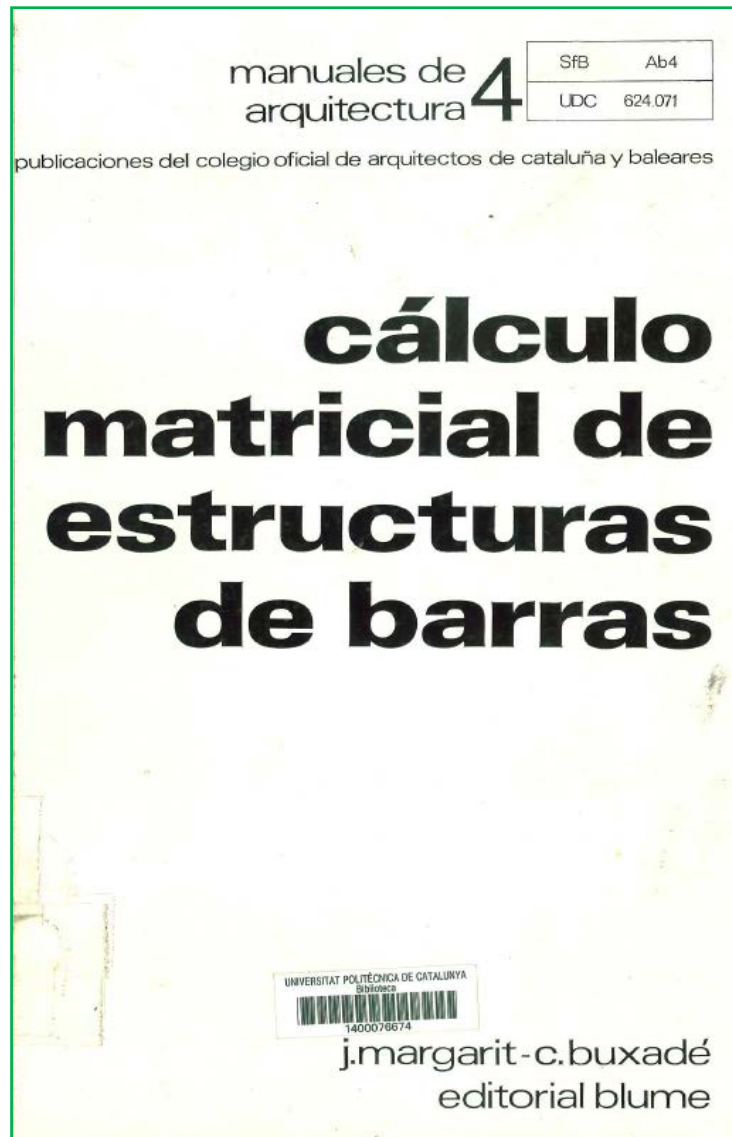


Figura 5.9 Cálculo matricial de estructuras de barras. Joan Margarit, Carles Buxadé.

Serà, per tant, aquesta nova eina la que farà replantejar la formulació de les equacions que defineixen l'equilibri estructural i en molt casos retrobar-ne

⁹ Apartat 2.2.1.1. Quatre moments.

¹⁰ Apartat 3.2.1.3. Mètode Kleinlogel.

¹¹ Apartat 4.2.1.1. Mètode de Cross.

¹² Cálculo matricial de estructuras de barras. Joan Margarit, Carles Buxadé.

d'antigues que, com hem vist, demanaven una resolució matemàtica impossible de dur a terme fins llavors. Podria ser el cas de les equacions de les slope-deflection¹³ per exemple.

Disposant, d'aquesta eina informàtica, primer en centres de càlcul, després als departaments i actualment ja individualment, la resolució de les equacions o sistemes d'equacions plantejats ja no esdevindrà un problema.

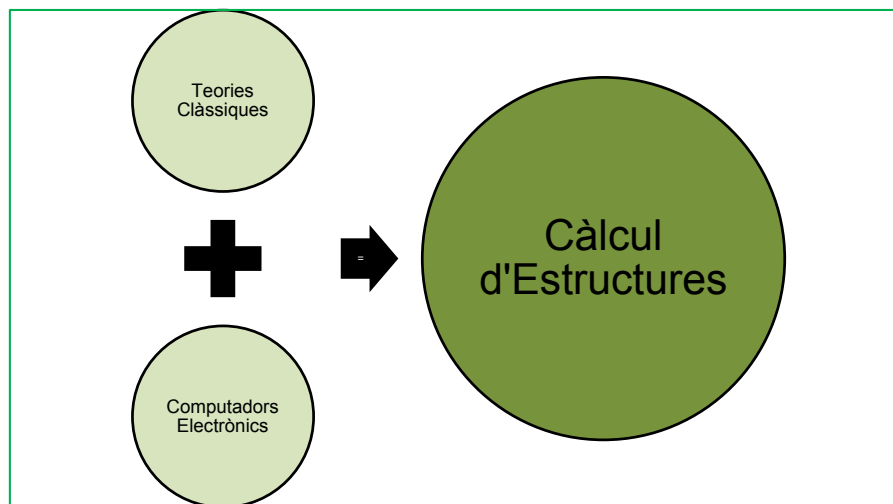


Figura 5.10 Nou enfocament del càlcul d'estructures a partir dels mètodes numèrics

Serà, per tant, la relació entre ambdós (teories clàssiques i la informàtica) la que farà que surtin a la llum els mètodes computacionals de càlcul d'estructures que bàsicament els podem dividir en **mètodes matricials** i **el mètode dels elements finits** segons classificacions de l'època i que mantindrem en l'exposició per adaptar-nos a la realitat dels texts que a continuació s'estudiaran.

El empleo de la teoría de matrices hace posible reducir el detalle de las operaciones numéricas requeridas para el cálculo de una estructura determinada a un proceso sistemático de manipulación de matrices. En términos de trabajo manual de cálculo, estos procesos son tediosos y, a menudo llevan consigo más labor que la requerida por los métodos convencionales de análisis.

¹³ Apartat 3.2.1.1. Mètode slope- deflection.

Por esta razón, **raramente los métodos matriciales son ventajosos si todas las operaciones aritméticas han de hacerse manualmente.** Sin embargo, las operaciones numéricas con matrices pueden llevarse a cabo facilísimamente en computadoras digitales, y el desarrollo de estas máquinas en la última década es el que ha permitido al cálculo matricial de estructuras convertirse en una operación práctica¹⁴.

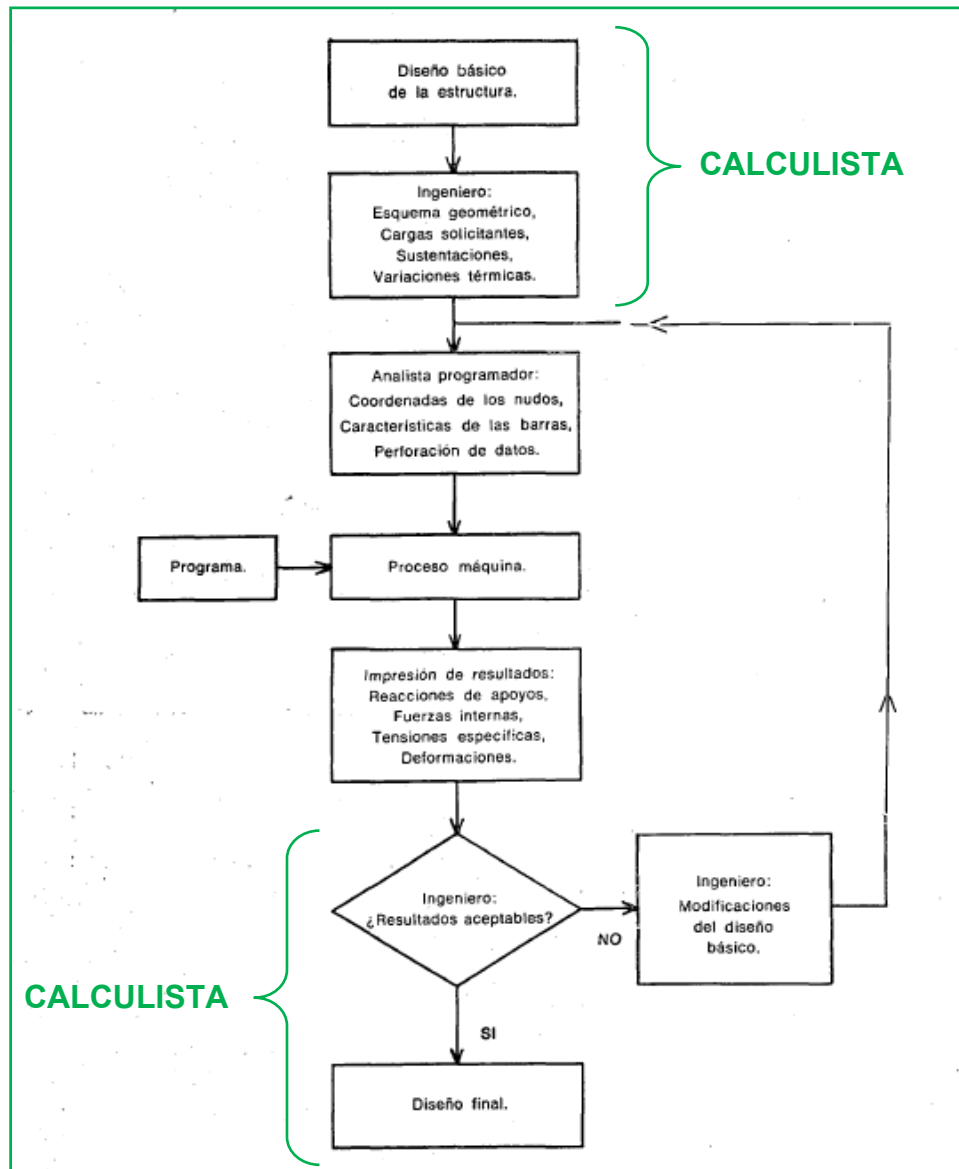
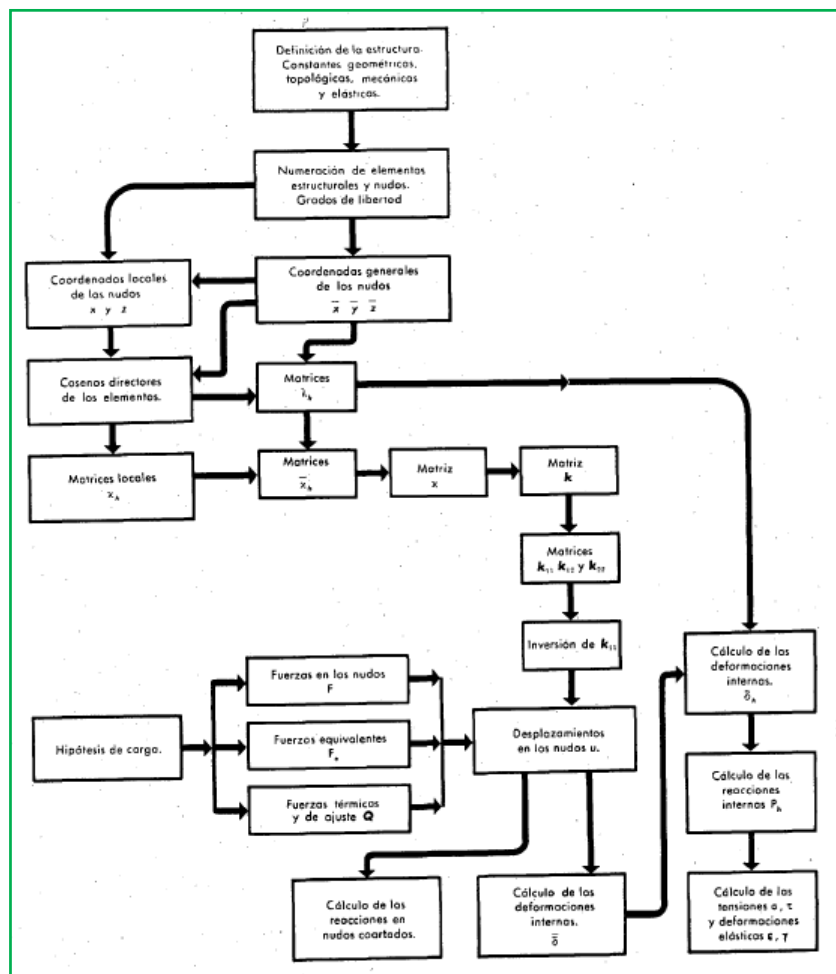


Figura 5.11 Organigrama funcional para el cálculo de una estructura¹⁵.

¹⁴ Livesley, R.: Métodos matriciales para cálculo de estructuras. Madrid, 1970.

¹⁵ Ideas preliminares en torno a la mecanización del cálculo de estructuras. Federico Alicart 1968. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1968/1968_tomol_3039_04.pdf.

S'ha trobat molt interessant l'organigrama presentat a la *Revista Obras P ublicas* (R.O.P.) de juliol de 1968 on es mostra el nou enfocament del càlcul estructural. Si fins ara el responsable del càlcul duia a terme tot el procés, tal i com s'ha fet notar en BLOCS precedents, a partir d'ara es podrà dedicar fonamentalment **al plantejament del problema inicial i a la interpretació de les dades resultants**. Amb aquestes premisses es pot deixar el procés de càlcul, pròpiament dit, en un estadi que no caldrà que necessàriament dugui ell personalment. Un cop proposat l'esquema deriva el problema cap a la seva implementació matemàtica; és a dir a la necessitat de reformular les equacions sabudes mitjançant l' lgebra matricial per dur aconseguir la solució. El citat autor Federico Alicart, public  un article¹⁶ on presentava un algorisme que ell mateix proposava per resoldre el problema matricialment tal i com es mostra.



¹⁶ Métodos matriciales para mecanizar el cálculo de estructuras. Federico Alicart 1969. Font: http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1969/1969_tomol_3045_01.pdf.

Com es pot observar el seu plantejament continuaria essent totalment vàlid avui en dia. És en aquest context que a l'estat espanyol, durant la dècada dels anys 60, comencen a sovintejar articles que fan referència a **la importància del càlcul matricial** que llavors començava. Antonio Nieto Llobet publica *un método matricial para resolver estructuras por medio de cálculo electrónico*¹⁷ del qual en poden obtenir unes importants reflexions;

El gran impacto que ha tenido los ordenadores electrónicos dentro del campo técnico ha hecho que numerosos problemas cuya resolución era un proceso laborioso y sujeto a posibles errores, **se hayan abordado con ayuda de nuevos instrumentos de cálculo**. Es más, en algunos casos, quizás el problema en su planteamiento haya sido trivial, pero luego, **por imposibilidad práctica de cálculo**, se ha tenido que acudir a procedimientos iterativos o de relajación como única forma admisible de llegar a la solución. El problema se puede reducir en última instancia a plantear un sistema lineal **cuyas incógnitas son los giros de cada nudo y las traslaciones** posibles de la estructura.

Conocidos los giros y traslaciones, **ya es fácil calcular el valor de los momentos y cortantes finales**, que **la misma máquina se encarga de darnos si así se lo programamos**.

21

Hi ha hagut diversos llibres que han estat bàsics a les escoles tècniques a l'hora d'explicitar el càlcul matricial; en destaquem els següents:

- *Teoría de las estructuras*, degut als professors Timoshenko y Young.
- *Cálculo de estructuras*, del Dr. Ramon Argüelles Álvarez.
- *Teoría de estructuras*, del Dr. Josep Maria Fornons García.

Serà en base a aquests tres materials que es presentarà la formulació del mètode matricial. Com sempre, al llarg del treball, s'ha intentat prendre els materials més emprats i consultats a les escoles tècniques, bressol dels futurs tècnics.

¹⁷ Un método matricial para resolver estructuras por medio de cálculo electrónico. Antonio Nieto Llobet 1965. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1965/1965_tomol_2999_04.pdf

El professor Stephen Timoshenko¹⁸, publicà l'any 1945 el llibre *Theory of Structures* que tingué (i ha tingut) una gran divulgació i influència en els àmbits tant docents com professionals. Nosaltres ens centrarem bàsicament en l'apartat de *métodos matriciales en el cálculo de estructuras* que implementà en l'edició (segona) amb la qual estem treballant -malgrat encara no s'havia entrat a la dècada dels 50. Amb aquest detall ja s'intueix la importància que ell donava als mètodes matricials i sobretot el futur que aquests tenien davant seu.

Desde la aparición de este libro (*Theory of Structures*) en 1945, han cobrado mucha importancia dos nuevos aspectos del análisis estructural, a saber: **el empleo de métodos matriciales para formular problemas** y el análisis de estructuras bajo cargas dinámicas.

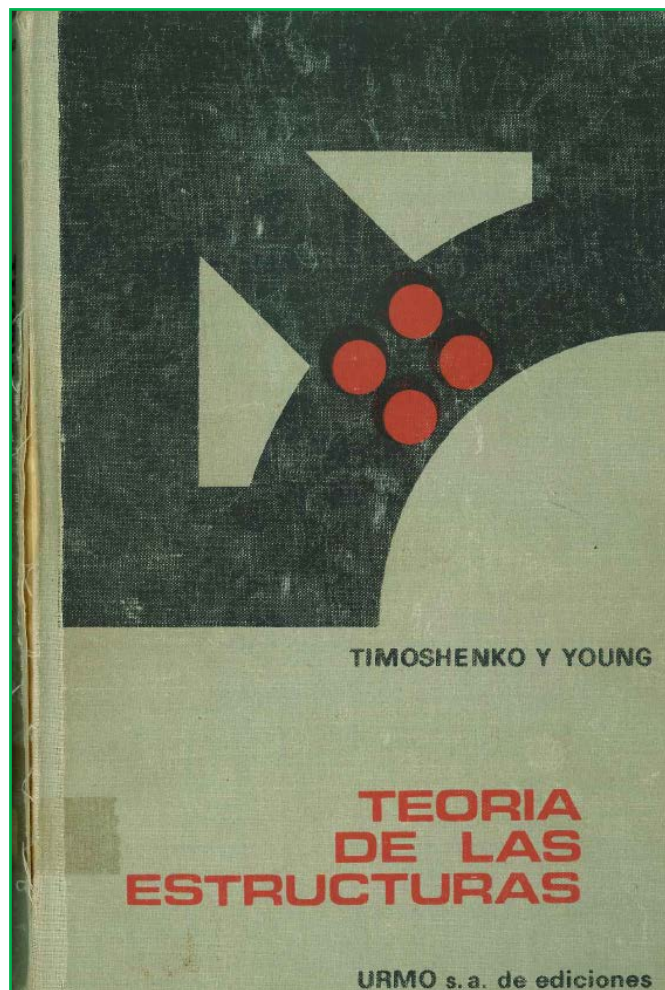
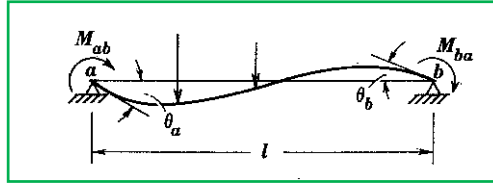


Figura 5.12 Teoría de las estructuras. Stephen Timoshenko. 2ª edición

¹⁸ Stephen Timoshenko (1878-1972)

Timoshenko començà l'estudi, com ho feu també Fernández Casado, amb una senzilla biga contínua sobre recolzaments i sense la possibilitat d'assentaments. El motiu expressat és segons l'autor *para no distraer la atención de los hechos esenciales del método matricial*.



Les equacions elàstiques eren conegudes com havíem vist;

$$M_{ab} = k(4\theta_a + 2\theta_b) + \mathcal{M}_{ab}$$

$$M_{ba} = k(4\theta_b + 2\theta_a) + \mathcal{M}_{ba}$$

On \mathcal{M}_{ab} i \mathcal{M}_{ba} són els moments d'encastament perfecte i k la rigidesa de la biga definida com $k = \frac{EI}{L}$.

23

Les equacions anteriors es poden escriure matricialment,

$$\begin{bmatrix} M_{ab} \\ M_{ba} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4k & 2k \\ 2k & 4k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{ab} \\ \mathcal{M}_{ba} \end{bmatrix}$$

d'on es dedueix l'anomenada matriu de rigidesa de la biga

$$K = \begin{bmatrix} 4k & 2k \\ 2k & 4k \end{bmatrix}$$

i generalitzant-ho, obtenim;

$$K = \begin{bmatrix} K_a & R \\ R & K_b \end{bmatrix}$$

Per tant;

$$\begin{bmatrix} M_{ab} \\ M_{ba} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a & R \\ R & K_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_a \\ \theta_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{ab} \\ \mathcal{M}_{ba} \end{bmatrix}$$

Un cas important, de cara a la simplificació del problema és el d'una biga amb un sol moment en l'extremitat; és a dir $M_{ab} = 0$, que fa que les equacions anteriors es simplifiquin i s'obtingui els valors de **rigidesa modificada** i **moment d'encastament modificat** que tenen els següents valors respectivament:

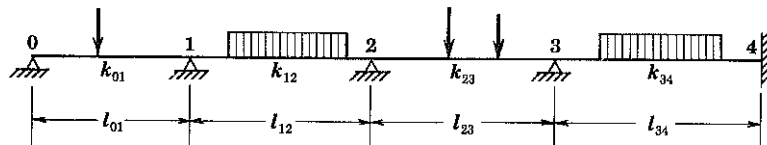
$$K'_b = \frac{K_a K_b - R^2}{K_a}$$

$$\mathcal{M}'_{ba} = \mathcal{M}_{ab} - \frac{R}{K_a} \mathcal{M}_{ba}$$

Quedant l'equació corresponent reduïda a:

$$M_{ba} = k'_b \theta_b + \mathcal{M}'_{ba}$$

Aquest cas és pot generalitzar, segons l'autor, al de les bigues contínues. Ell proposa el següent exemple; biga contínua amb càrrega puntual i repartida.



Comença amb l'aplicació de les equacions obtingudes prèviament. (Es suposa que els moments d'encastament perfecte són coneguts. Ja en el seu moment varem dir que a la dècada que ens abasta els Teoremes de Mohr i l'Equació de l'Elàstica eren perfectament coneguts).

- Tram esquerra de cada un dels trams.

$$M_{12} = K_{12} \theta_1 + R_{12} \theta_2 + \mathcal{M}_{12}$$

$$M_{23} = K_{23} \theta_2 + R_{23} \theta_3 + \mathcal{M}_{23}$$

$$M_{34} = K_{34} \theta_3 + \mathcal{M}_{34}$$

Que escrit en forma matricial ho podem expressar com:

$$\begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{23} \\ M_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{12} & R_{12} & 0 \\ 0 & K_{23} & R_{23} \\ 0 & 0 & K_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{12} \\ \mathcal{M}_{23} \\ \mathcal{M}_{34} \end{bmatrix}$$

- Tram dreta de cada un dels trams

$$\begin{aligned} M_{10} &= K'_{10}\theta_1 + \mathcal{M}_{10} \\ M_{21} &= R_{21}\theta_1 + K_{21}\theta_2 + \mathcal{M}_{21} \\ M_{32} &= R_{32}\theta_2 + K_{32}\theta_3 + \mathcal{M}_{32} \end{aligned}$$

Que escrit en forma matricial ho podem expressar com:

$$\begin{bmatrix} M_{10} \\ M_{21} \\ M_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_{10} & 0 & 0 \\ R_{21} & K_{21} & 0 \\ 0 & R_{32} & K_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{M}'_{10} \\ \mathcal{M}_{21} \\ \mathcal{M}_{32} \end{bmatrix}$$

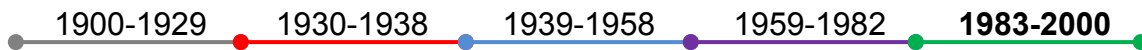
Podem compactar les expressions obtingudes;

$$\begin{aligned} M_{ab} &= \begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{23} \\ M_{34} \end{bmatrix}; M_{ba} = \begin{bmatrix} M_{10} \\ M_{21} \\ M_{32} \end{bmatrix}; \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \\ \mathcal{M}_{ab} &= \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{12} \\ \mathcal{M}_{23} \\ \mathcal{M}_{34} \end{bmatrix}; \mathcal{M}_{ba} = \begin{bmatrix} \mathcal{M}'_{10} \\ \mathcal{M}_{21} \\ \mathcal{M}_{32} \end{bmatrix} \\ K_{ab} &= \begin{bmatrix} K_{12} & R_{12} & 0 \\ 0 & K_{23} & R_{23} \\ 0 & 0 & K_{34} \end{bmatrix}; K_{ba} = \begin{bmatrix} K'_{10} & 0 & 0 \\ R_{21} & K_{21} & 0 \\ 0 & R_{32} & K_{32} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Amb la qual cosa obtenim;

$$\begin{aligned} [M_{ab}] &= [K_{ab}][\theta] + [\mathcal{M}_{ab}] \\ [M_{ba}] &= [K_{ba}][\theta] + [\mathcal{M}_{ba}] \end{aligned}$$

Estas son las ecuaciones elásticas para cualquier viga continua, cuyos apoyos no puedan tener ningún asiento.



Per determinar els moments a les extremitats, hem de tenir present l'equilibri del nus; és a dir:

$$[M_{ab}] + [M_{ba}] = 0$$

i per tant,

$$[K][\theta] = -[M]$$

On la matriu K, així definida, s'anomena **matriu de rigidesa**

$$[K] = [K_{ab}] + [K_{ba}] = \begin{bmatrix} K_{12} + K'_{10} & R_{12} & 0 \\ R_{21} & K_{23} + K_{21} & R_{23} \\ 0 & R_{32} & K_{34} + K_{32} \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} \mathcal{M}_{12} + \mathcal{M}'_{10} \\ \mathcal{M}_{23} + \mathcal{M}_{21} \\ \mathcal{M}_{34} + \mathcal{M}_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 \\ \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{M}_3 \end{bmatrix}$$

amb la qual cosa obtenim la solució:

26

$$[\theta] = -[K]^{-1}[M]$$

Per obtenir finalment;

$$[M_{ab}] = [\mathcal{M}_{ab}] - [K_{ab}][K]^{-1}[M]$$

$$[M_{ba}] = [\mathcal{M}_{ba}] - [K_{ba}][K]^{-1}[M]$$

Concloent l'autor afirma;

Estas fórmulas matriciales pueden considerarse representativas de **la solución final del problema**; esto es, **definen todos los momentos de extremidad en los apoyos intermedios de la viga.**

Un cop resolta la biga contínua, l'autor passa a estudiar els pòrtics continus, estructures que segons ell;

En general muy indeterminadas estáticamente, de manera que en su análisis hay que tratar con un gran número de incógnitas. **La única forma práctica de resolver este problema es recurrir a ordenadores electrónicos y, para ello, lo más ventajoso es la formulación matricial.**

S'exemplifica el problema amb la següent estructura porticada de dos pisos. Cal recordar que a l'època que l'autor formula l'exercici ja es coneixia el mètode de Cross que també permetria la resolució del problema encara que en tractar-se d'una estructura amb estats paramètrics la seva resolució implicaria les quatre etapes corresponents.

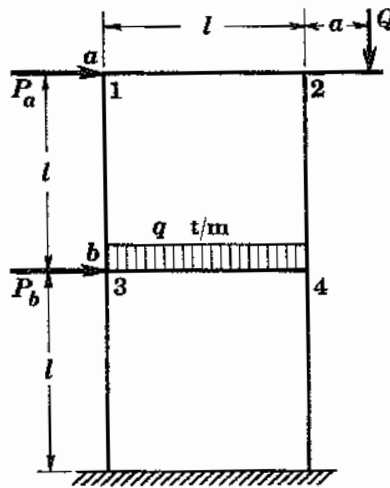


Figura 5.13 Pòrtic continu de dos plantes

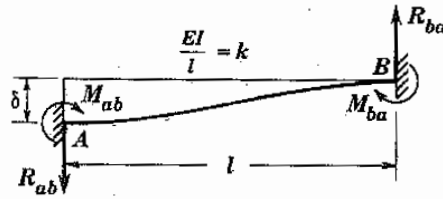
En quest cas tindrem 6 incògnites a l'hora de plantejar el problema; 4 que corresponen als angles de rotació $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ i 2 als desplaçaments δ_a, δ_b .

Prèviament a la resolució del problema es determinen els anomenats coeficients d'influència a rigidesa definits com aquells que **representen les reaccions o forces de vincle en els extrems de la biga quan les deformacions θ i δ són iguals a la unitat**¹⁹.

Aquests coeficients seran escrits en forma matricial sota les bigues corresponents.

¹⁹ També hi podem notar un cert paral·lelisme amb el mètode de Cross quant es defineixen la rigidesa i els parells locals.

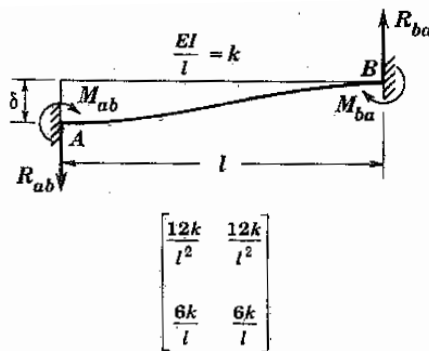
- Biga biencastada amb desplaçament d'un extrem.



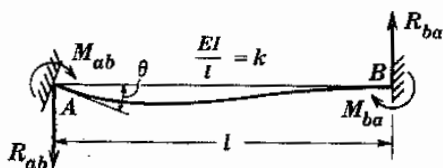
En aquest cas a la biga biencastada se li ha **provocat un desplaçament δ** a l'extrem A sense permetre-li cap rotació en A ni cap moviment en B. Per tant és fàcilment deduïble:

$$R_{ab} = \frac{12k}{l^2} \delta; \quad M_{ab} = \frac{6k}{l} \delta; \quad R_{ba} = \frac{12k}{l^2} \delta; \quad M_{ba} = \frac{6k}{l} \delta$$

Formulació que matricialment es pot escriure com²⁰:



- Biga biencastada amb rotació d'un extrem.

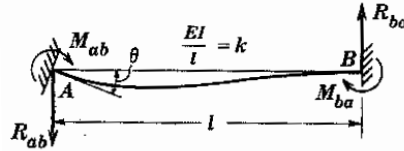


En aquest cas a la biga biencastada se li **ha provocat un gir θ** a l'extrem A sense permetre-li cap deformació lateral en A ni cap moviment en B. Per tant és fàcilment deduïble:

²⁰ Segons Timoshenko.

$$R_{ab} = \frac{6k}{l}\theta; M_{ab} = 4k\theta; R_{ba} = \frac{6k}{l}\theta; M_{ba} = 2k\theta$$

Formulació que matricialment es pot escriure com²¹:



$$\begin{bmatrix} \frac{6k}{l} & \frac{6k}{l} \\ 4k & 2k \end{bmatrix}$$

Un cop trobats els coeficients d'influència a la rigidesa i de bloquejar tota translació i gir a cada nus, l'autor, provoca un desplaçament unitari $\delta_j = 1$ a qualsevol dels 6 graus de llibertat que com hem vist te el pòrtic que estem estudiant. Aquest fet provocarà una reacció en cada un dels 6 esmentat graus de llibertat i per tant es trobaran el sistema de forces externes i parells necessaris per garantir les condicions que hem imposat prèviament a l'estructura un cop hem aplicat el desplaçament unitari. A la reacció externa que apareix en i la designem per S_{ij} .

Definim, per tant, **coeficient d'influència a la rigidesa** S_{ij} a la reacció externa en i deguda a un desplaçament unitari a j romanent la resta de desplaçaments igualats a zero.

Un cop definits aquests coeficients, Timoshenko passarà a l'aplicació definitiva. La metodologia que empra consistirà en eliminar totes les càrregues aplicades i bloquejar tots els nusos amb la qual cosa evita rotacions i desplaçaments. Sistemàticament anirà aplicant $\delta_1 = 1, \delta_2 = 1$ i $\theta_1 = 1, \theta_2 = 1, \theta_3 = 1, \theta_4 = 1$, mantenint en cada cas la resta bloquejada, amb la qual cosa obtindrà els diferents coeficients d'influència de rigidesa tal i com en la taula formulada ens mostra.

²¹ Segons Timoshenko.

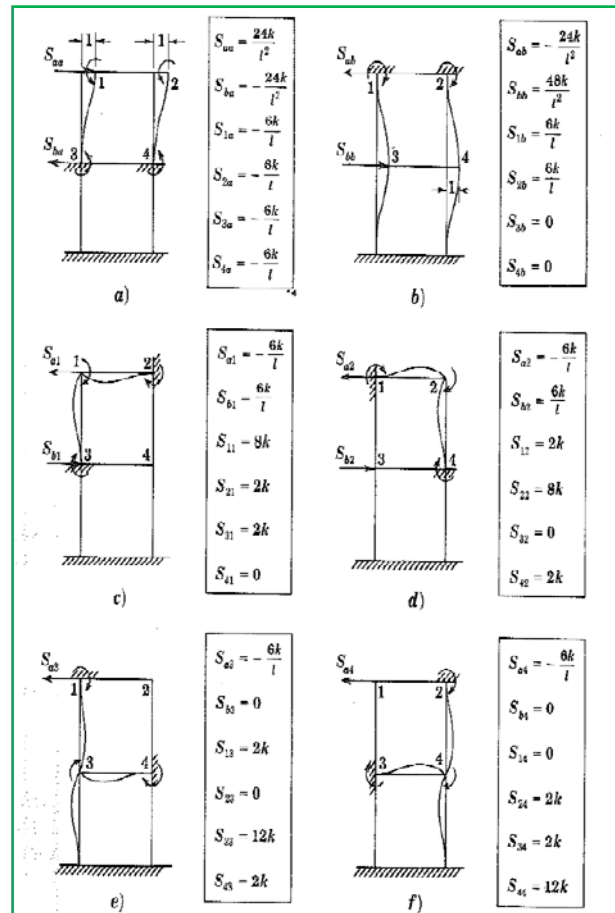


Figura 5.14 Obtenció dels distints valors S_{ij} .

Agrupant els coeficients en forma matricial i en ordre a,b,1,2,3,4 obtenim la següent matriu, anomenada **matriu de rigidesa de l'estructura**.

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{24k}{l^2} & -\frac{24k}{l^2} & -\frac{6k}{l} & -\frac{6k}{l} & -\frac{6k}{l} & -\frac{6k}{l} \\ \frac{24k}{l^2} & \frac{48k}{l^2} & \frac{6k}{l} & \frac{6k}{l} & 0 & 0 \\ -\frac{6k}{l} & \frac{6k}{l} & 8k & 2k & 2k & 0 \\ -\frac{6k}{l} & \frac{6k}{l} & 2k & 8k & 0 & 2k \\ -\frac{6k}{l} & 0 & 2k & 0 & 12k & 2k \\ -\frac{6k}{l} & 0 & 0 & 2k & 2k & 12k \end{bmatrix}$$

Les forces exteriors que actuen en el pòrtic definiran la matriu de càrrega que en aquest cas la podem escriure com:

$$[F_i] = \begin{bmatrix} P_a & P_b & 0 & Q_a & \frac{ql^2}{12} & -\frac{ql^2}{12} \end{bmatrix}$$

I per tant es poden trobar el conjunt de valors de les deformacions plantejant el següent sistema d'equacions:

$$\begin{aligned} S_{aa}\delta_a + S_{ab}\delta_b + S_{a1}\theta_1 + S_{a2}\theta_2 + S_{a3}\theta_3 + S_{a4}\theta_4 &= P_a \\ S_{ba}\delta_a + S_{bb}\delta_b + S_{b1}\theta_1 + S_{b2}\theta_2 + S_{b3}\theta_3 + S_{b4}\theta_4 &= P_b \\ S_{1a}\delta_a + S_{1b}\delta_b + S_{11}\theta_1 + S_{12}\theta_2 + S_{13}\theta_3 + S_{14}\theta_4 &= 0 \\ S_{2a}\delta_a + S_{2b}\delta_b + S_{21}\theta_1 + S_{22}\theta_2 + S_{23}\theta_3 + S_{24}\theta_4 &= Q_a \\ S_{3a}\delta_a + S_{3b}\delta_b + S_{31}\theta_1 + S_{32}\theta_2 + S_{33}\theta_3 + S_{34}\theta_4 &= \frac{ql^2}{12} \\ S_{4a}\delta_a + S_{4b}\delta_b + S_{41}\theta_1 + S_{42}\theta_2 + S_{43}\theta_3 + S_{44}\theta_4 &= -\frac{ql^2}{12} \end{aligned}$$

i en notació matricial,

$$[S_{ij}][\delta_j] = [F_i]$$

31

amb la qual cosa es pot deduir ràpidament el valor de les deformacions,

$$[\delta_j] = [S_{ij}]^{-1}[F_i]$$

I per tant, segons l'autor;

Una vez conocidas estas deformaciones **se pueden calcular fácilmente todos los momentos de extremidad en la estructura mediante las ecuaciones elásticas.**

Timoshenko conclou el càlcul matricial tot i lloant les seves avantatges;

En este ejemplo se aprecia que el método matricial es más ventajoso que cualquiera de los discutidos hasta ahora, en **el supuesto de que se disponga de un ordenador electrónico para invertir la matriz de rigidez.**

Així doncs, un cop presentat el mètode matricial, i tal i com veurem amb el mètode dels elements finits, destacar novament que aquests mètodes tenen la seva aplicació sempre que es disposi d'algun dispositiu electrònic. Aquest -originàriament fou un ordinador i avui en dia un element electrònic com una calculadora programable ja serviria- **ha de ser capaç de fer els càlculs; especialment els referits a la matriu de rigidesa i a la seva inversa.**

El 80 por ciento del tiempo de cálculo, **la máquina lo emplea en invertir la matriz de rigideces** y solamente el 20 por ciento en aplicarla a la de términos independientes. Una vez se haya calculado la matriz inversa, ésta nos servirá para cualquier caso de carga (sólo depende de la geometría de la estructura), y únicamente bastará, en cada caso, aplicar esta matriz inversa a las distintas matrices términos independientes. (Tantas como hipótesis de carga queremos considerar).

Con poco aumento de tiempo de cálculo podremos obtener más precisos resultados, al tantear más hipótesis.

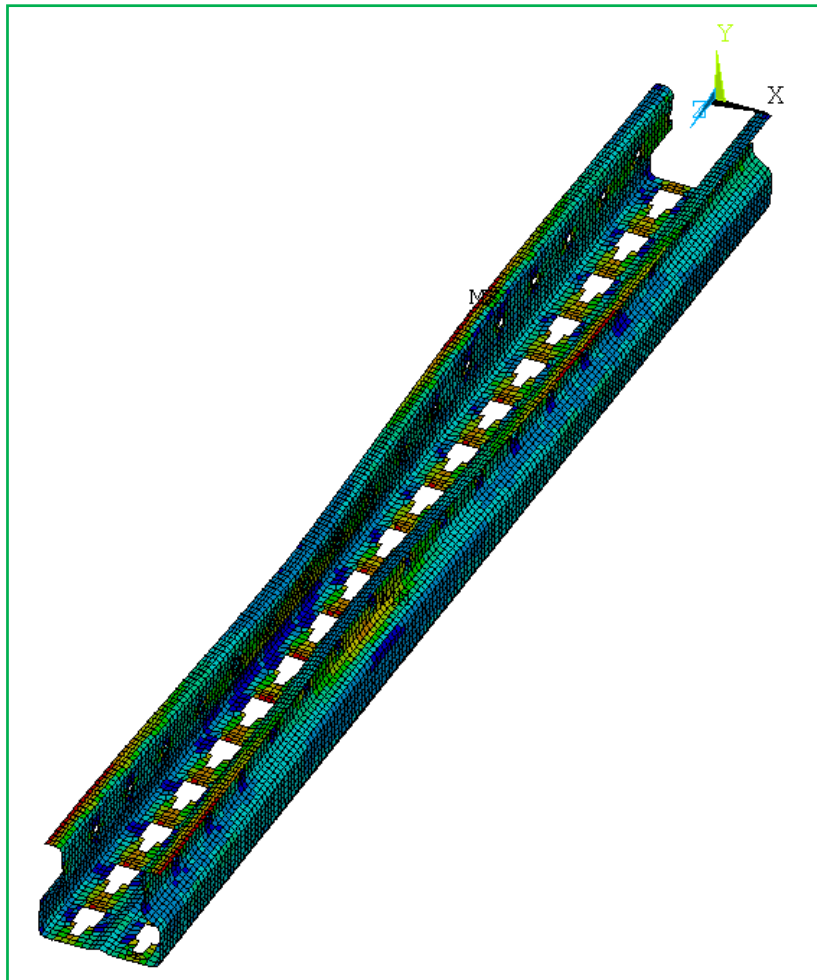
32

Un programa basado en este método se ha construido para un ordenador **IBM 1620, con 20000 posiciones de memoria**, y ha sido aplicado para el cálculo de diversas estructuras²².



Figura 5.15 Ordinador IBM 1620.

²² Un método matricial para resolver estructuras por medio de cálculo electrónico. Antonio Nieto Llobet 1965. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1965/1965_tomol_2999_04.pdf.



5.2.1.2. Mètode dels elements finits

El mètode dels elements finits M.E.F.²³, ha esdevingut un dels mètodes de càlcul de referència a la última part del segle XX. El seu origen ha estat font de polèmica; atribuït a matemàtics o a enginyers en funció del ponent o de l'articulista. El que sí que ningú discrepa és en la seva absoluta versatilitat científica actualment.

No és l'objectiu del present treball aprofundir en ell, tal i com s'ha fet en els mètodes anteriors, ja que el M.E.F. constituiria per si sol un treball de recerca. Aquest fet vindria constatat pel gran nombre d'entrades, tant de llibres com d'articles, que tant el mètode en sí, com la seves múltiples aplicacions, generen actualment.

Són diverses les referències a la gènesi del Mètode dels Elements Finitos i, sobretot, a la gran anomenada que va prendre així com la gran versatilitat d'aplicacions que d'ell se'n derivaren. Recordem que fins llavors el mètode més emprat era el mètode de Cross el qual, com varem veure al BLOC IV, era absolutament manual que, amb sort, i amb el pas dels anys s'havia arribat a implementar amb l'ajut d'algun element de càlcul que permetia resoldre les equacions d'equilibri degudes fonamentalment a les etapes paramètriques.

34

El progreso, en este sentido, ha conducido al desarrollo del método de los elementos finitos, que es, sin duda alguna, **el procedimiento más popular y extensamente utilizado** en la utilidad como útil para la discretización de problemas de mecánica de medios continuos.

Ni siquiera los mismos promulgadores iniciales del término elementos finitos podían imaginar, allá al comienzo de la década de los 60, cuando por primera vez se bautizó con tal nombre a las porciones discretas de un continuo elástico, que el **método iba a ser adoptado por un gran número de investigadores interesados en los campos más diversos** que lo potenciarían hasta convertirlo en el poderoso instrumento que ha llegado a ser hoy día, **capaz de resolver los problemas más complejos en las más variadas disciplinas**²⁴.

²³ Finite Element Method (F.E.M.)

²⁴ José Antonio Torroja Cavanillas. Pròleg "El método de los elementos finitos". O. C. Zienkiewicz.

Una posible definició...

Segons el professor O. C. Zienkiewicz²⁵ pioner i referent²⁶ del M.E.F;

La existencia de una manera única para abordar los problemas discretos tipo, nos lleva a la primera definición del método de los elementos finitos como **procedimiento de aproximación de problemas continuos**, de tal forma que:

- El **continuo se divide en un número finito de partes** (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros.
- La solución del sistema completo como **ensamblaje de los elementos** sigue precisamente las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos tipo.

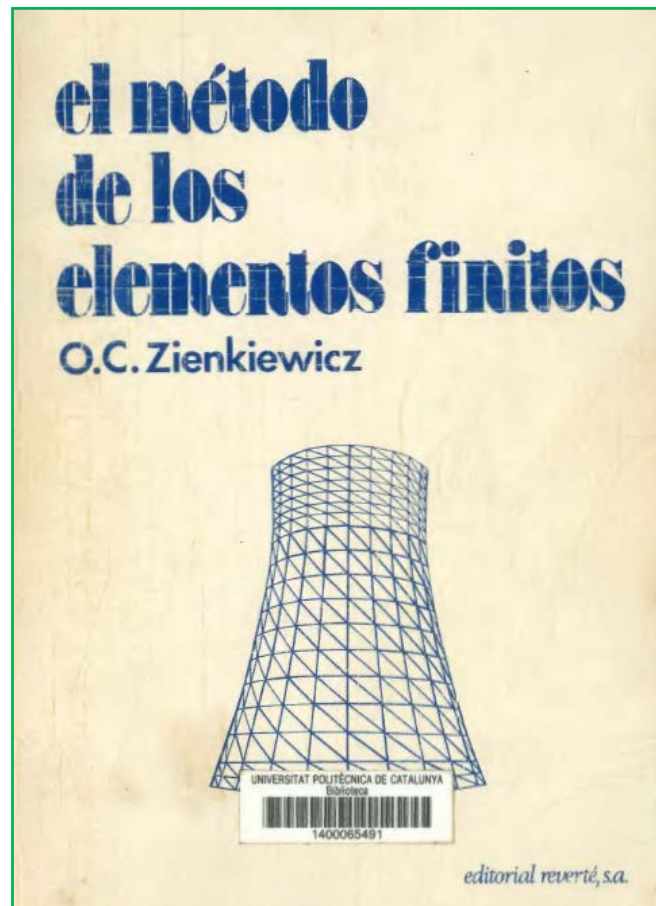


Figura 5.16 El Método de los Elementos Finitos. O.C. Zienkiewicz.

²⁵ Olgierd Cecil Zienkiewicz (1921-2009)

²⁶ <http://rsbm.royalsocietypublishing.org/content/55/337.full.pdf+html?sid=5dea001c-f378-4a03-91f0-e8b0fc289dfb>.

Punt de partida

Podem fixar el naixement del mètode al voltant dels anys 50 segons es recull d'articles relacionats²⁷;

During the early 1950 s, the Boeing Company approached UW engineering professor **Harold C. Martin** about a solution to the structural analysis problem. In response to that request, work by Martin and colleagues at the University contributed significantly to the development of an analysis technique now known as **the finite element method**. Employed almost universally today in industry and academia, the finite element method has become one of the main computing tools of scientists and engineers and a standard element of any engineering curriculum. **It is used to analyze complex structures, and to solve problems in fluid mechanics and heat transfer.**

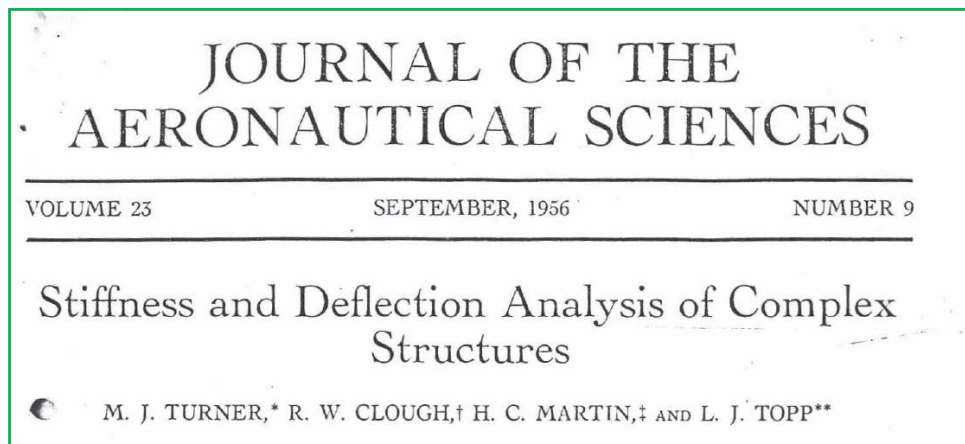


Figura 5.17 Journal of the aeronautical sciences. 1950²⁸

Tal i com es constata, la versatilitat del mètode és immensa, i ja als seus inicis es preveia l'enorme món que s'obria davant dels científics/tècnics dels camps més diversos;

The basic scheme of the finite element method is to substitute a simplified problem for a complex one. An odd-shaped wing panel of a high-speed aircraft can be represented as an assemblage of tiny panels of triangular

²⁷ <http://www.washington.edu/research/pathbreakers/1950b.html>

²⁸ M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp, "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures," *J. of Aero. Sci.*, **23** (9), Sept. 1956

shape. Taking advantage of the computational power of modern computers and some advanced techniques of matrix mathematics, the large number of small triangular elements can be used to solve complex problems that otherwise would be intractable for the complete structure.

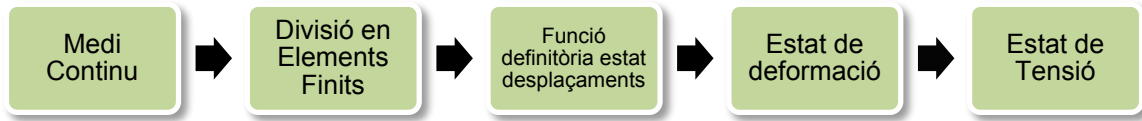
A l'any 1972 trobem articles on es defineix la metodologia a emprar per tal d'una correcta aplicació del M.E.F. Un d'aquests; *el cálculo electrónico de estructuras planas por el método de los elementos finitos*²⁹, ens dóna un perfecte guiatge, **aplicable avui en dia**, per a l'obtenció de la solució final. La diferència entre l'any 1972 i avui dia raurà novament en **l'avenç dels sistemes electrònics i informàtics** que cada vegada permetran **obtenir la solució desitjada amb una rapidesa major i amb uns elements de càlcul més potents** ahora que més petits en quant a espai físic.

El medio continuo se divide, por medio de líneas imaginarias en un **cierto número de elementos finitos**; en nuestro caso serán triángulos o rectángulos. Los elementos se suponen **interconectados en un número finito de nudos** situados en su contorno. **Los desplazamientos de estos nudos serán las incógnitas básicas del problema** exactamente igual que en el análisis estructural simple.

Se define una **función para establecer unívocamente el estado de desplazamientos** dentro de cada elemento finito en función de los desplazamientos de los nudos. Las funciones de desplazamiento definen así, unívocamente, **el estado de deformaciones** dentro de un elemento en función de los desplazamientos de sus nudos. Estas deformaciones junto con las deformaciones iniciales, si existen, y las propiedades elásticas del material, definirán **el estado de tensiones en el interior del elemento** y, por tanto, también en su contorno. De este modo, **cualquier sistema de fuerzas concentradas en los nudos quedará determinado por una relación matricial de rigidez con los desplazamientos de los nudos**. La resolución de esta ecuación da **el resultado buscado**.

²⁹ http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1971/1971_tomol_3079_04.pdf.

Gràficament ho podem esquematitzar com segueix;



Les aplicacions que s'intuïen al M.E.F., com dèiem, ja varen ser moltes des del seu inici. *Desai i Abel*³⁰ l'any 1972 en publicaren les possibilitats. Les recollim a la següent taula que s'ha cregut interessant annexar més que res pel valor històric que té doncs, a més de 40 anys vista, ja preveia tot el que amb el mètode es podria acabar duent a terme.

Enginyeria d'estructures. Mecànica estructural. Enginyeria Aeroespacial.		
Análisis de vigas, placas y láminas. Estructuras híbridas complejas. Análisis bidimensional y tridimensional de tensiones Torsión de barras prismáticas.	Estabilidad de Estructuras. Frecuencias naturales y modos de vibración de estructuras. Amortiguamiento viscoelástico lineal.	Propagación de ondas. Respuesta dinámica de estructuras bajo cargas no periódicas. Problemas viscoelásticos y termoviscoelásticos acoplados. Problemas viscoelásticos.
Mecánica de sòls. Enginyeria de cimentacions. Mecànica de roques.		
Análisis bi y tridimensional de tensiones. Problemas de construcción y excavación. Problemas de estabilidad de taludes. Interacción suelo-estructura. Análisis de presas, túneles, sondeos, diques, etc. Filtración estacionaria de fluidos en suelo y roca.	Frecuencias naturales y modos de vibración de combinaciones estructura-suelo.	Filtración no estacionaria en suelos y rocas. Flujo con consolidación en medio poroso deformable. Propagación de ondas en suelos y rocas. Interacción dinámica suelo-estructura.
Conducció de calor.		
Distribución estacionaria de temperatura en sólidos y líquidos.		Flujo no estacionario de calor en sólidos y líquidos.

³⁰ Desai, C. S., and Abel, J.F., Introduction to the Finite Element Method: A Numerical Method for Engineering Analysis, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972. Tenth Reprint. Translated into Japanese and Chinese (Peking). Asian (Indian) Edition, Taiwanese Edition.

Hidrodinàmica. Enginyeria hidràulica i recursos hidràulics.		
Soluciones de flujo potencial de fluidos. Soluciones de flujo viscoso de fluidos. Filtración estacionaria en acuíferos y medios porosos. Análisis de estructuras hidráulicas y presas.	Mareas de lagos y puertos (períodos naturales y modos de oscilación). Salpicadura de líquidos en contenedores flexibles y rígidos.	Estudios de salinización y contaminación de estuarios (difusión). Transporte de sedimentos. Flujo no estacionario. Propagación de ondas. Filtración no estacionaria en medio poroso y acuíferos.
Enginyeria nuclear.		
Análisis de estructuras de contención del reactor. Distribución estacionaria de temperatura en reactor y estructuras del reactor.		Análisis dinámico de estructuras de contención del reactor. Análisis termo viscoelástico.

Com al principi es feia notar no és objectiu del present estudi l'anàlisi rigorosa del M.E.F. ni l'estudi d'aplicacions concretes ja que per si soles constituïrien un treball exhaustiu que sortiria fora del nostre context. El que s'ha volgut marcar ara i aquí ha estat, de manera semblant als altres mètodes, la gènesi, la implementació, així com la repercussió i docència dins els escoles tècniques que el mètode provocà. No cal dir que, des dels anys 70 fins a l'actualitat, la seva referència ha estat constant, i no només en matèries com l'elasticitat o la resistència de material, sinó com ja preveïen *Desai* i *Abel* en àmbits com la mecànica de fluids, la termodinàmica, només per citar-ne alguns.



Figura 5.18 International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)³¹.

³¹ Font: <http://www.cimne.com/cdl1/spacehome/2/0##>

Per concloure l'explicació del mètode s'ha cregut interessant citar el llibre del professor Fornons que, com al mètode matricial citat prèviament, presentà un llibre de caire fonamentalment didàctic -sense oblidar el rigor i l'exegesi pròpies- el qual era, i és encara, emprat a les escoles tècniques.



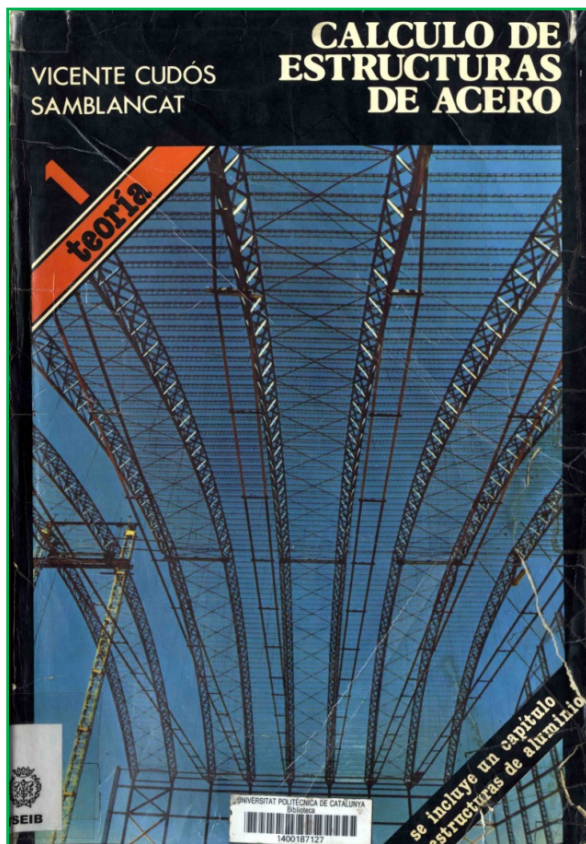
Figura 5.19 El Método de los Elementos Finitos en la ingeniería de estructuras. J .M^a. Fornons



5.2.2. Mètodes de dimensionament de peces i unions

Si al BLOC anterior ens referíem als apunts publicats pel professor Gonzalo Ceballos, en aquest ho farem també amb part del material que s'emprava a l'Escola Tècnica de Barcelona per referir-nos-hi. Tot i que les entrades bibliogràfiques són abundants, s'ha cregut just presentar els dos materials més emprats i més referits pels tècnics i/o professors encarregats de la docència³².

A la primera part del període ens trobem amb el llibre del doctor **Vicente Cudós Samblancat** catedràtic que fou d'estructures a l'ETSEIB. Personalment vull fer un sentit agraïment al professor Cudós que morí durant la redacció del present treball pel seu ajut desinteressat quant fou consultat. L'altre material emprat -especialment a partir de finals de la dècada dels vuitanta principis- es deu a la reimpressió del llibre del professor **Fernando Rodríguez-Avial Azcunaga** *Construcciones Metálicas* que conjuntament amb les múltiples edicions del mateix indiquen la seva rellevància.



³² També cal citar el llibre del professor Ramon Argüelles *La Estructura Metálica hoy*, prèviament referit als BLOC precedents.

Este libro se ha escrito tomando como base los apuntes de Estructuras metálicas que comencé a redactar durante mi época de catedrático de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona.

Així comença el pròleg del llibre del professor Cudós on fa referència del seu recordat pas per l'ETSEIB. El llibre, fonamental dins el món de l'estructura metàl·lica consta d'un primer volum de gairebé 900 pàgines (teoria) i d'un segon de taules i àbacs.



Figura 5.20 Cálculo de estructuras de acero. Vicente Cudós Samblancat.

Tot i que se'n podrien dir moltes coses del present treball del professor Cudós, destacaríem com a rellevant el fet de dedicar un capítol al tema de les **accions dinàmiques**, aspecte que fins ara era difícil de trobar en els llibres. Aquest fet reafirmaria el que hem anat veient durant aquest BLOC V de nous temps amb noves realitats.

Vista aquesta premissa, passem ja a abordar el tema que ens ocupa.

El professor Cudós dedica 66 pàgines a parlar de la soldadura i 44 pàgines a parlar de reblons i cargols (tot i agrupant-los). Podríem deduir, fruit d'una ràpida conclusió, que la soldadura guanya terreny enfront les altres tipologies. L'autor destaca que les unions emprades a les construccions són:

- **Unions per soldadura.**
- Unions per reblons.
- Unions per cargols.
- Unions per cargols d'alta resistència.
- **Unions per coles especials** (en experimentació).

44

La premissa anterior denota que la importància que es donava a les escoles tècniques als sistemes d'unió vindria primat per la soldadura encara que és important destacar que tots els mètodes eren explicats i emprats. De fet cal recordar que la normativa **MV** a la qual ens hem referit així ho especificava. Tot i això cal destacar, un cop llegits els corresponents capítol, un parell de dades que han resultat, si més no rellevants.

Primer el fet de presentar, encara que remarcant un caire experimental, un nou sistema d'unió; *les uniones por colas especiales*. Tot i que Cudós no ho explicita més, és important destacar que els nous temps als quals ens referíem i les noves necessitats del país portaran associats també nous estudis i recerca per trobar noves metodologies que en un futur no molt llunyà seran una realitat. Fins ara era molt difícil trobar als llibres apartats on, encara que experimentalment, parlessin de realitats futures.

També, en segon terme, destacar que, en parlar del tema de les soldadures, l'autor fa referència que;

1900-1929

1930-1938

1939-1958

1959-1982

1983-2000

Existen cerca de **cuarenta sistemas de soldar**, pero el más importante para las estructuras metálicas es el sistema de **soldadura por fusión**.

Destacar, com a l'ítem anterior, que la innovació i l'estudi estaven prenent cos dins la indústria i els ens tecnològics- i aquesta realitat es mostrava en multiplicitat de processos i tasques.

L'altre llibre referit prèviament és del professor Fernando Rodríguez-Avial Azcunaga; *Construcciones Metálicas*.

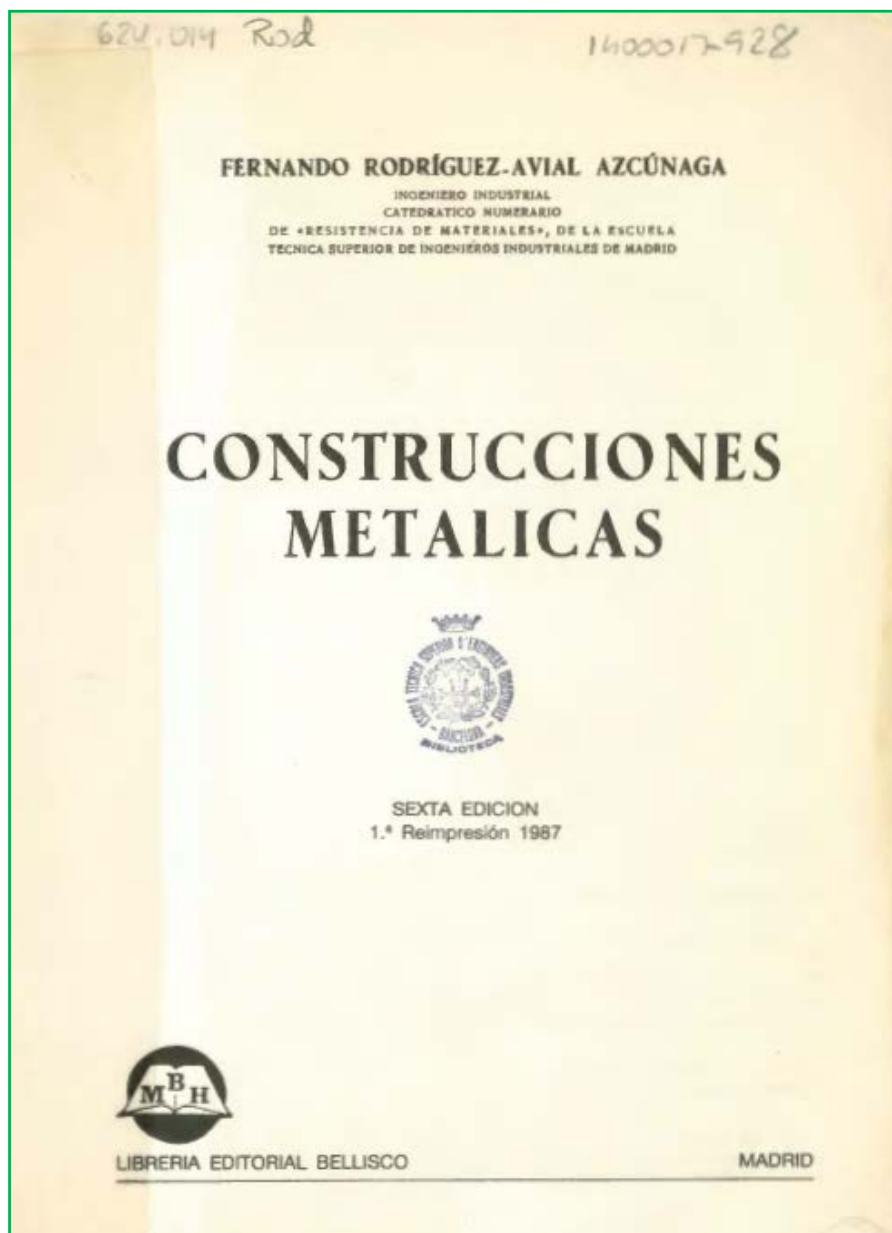


Figura 5.21 Construcciones Metálicas. Fernando Rodríguez-Avial.

Existen tres tipos de enlaces fundamentales en las construcciones metálicas: **las uniones remachadas**, todavía hoy frecuentes en la construcción; las uniones atornilladas que sustituyen en ciertas circunstancias a **las roblonaduras**, y **las uniones por soldadura**, técnica moderna y notorias ventajas, que se extiende rápidamente en el campo de la construcción.

Tal i com es pot apreciar la diferència entre ambdós textos, tot i diferir gairebé una dècada, pràcticament fora inapreciable. Aquest fet ens dóna a entendre que és un denominador comú del període. Tot i això sí que és important remarcar la cada vegada més recurrent presència de les unions amb cargols d'alta resistència.

A estos tipos fundamentales se ha de agregar el nuevo método de **uniones con tornillos de acero de alta resistencia**, fuertemente apretado. Este método, de cierta semejanza con los de uniones remachadas y atornilladas, presenta diferencias importantes respecto a ellos, en cuanto al modo de transmitirse los esfuerzos.

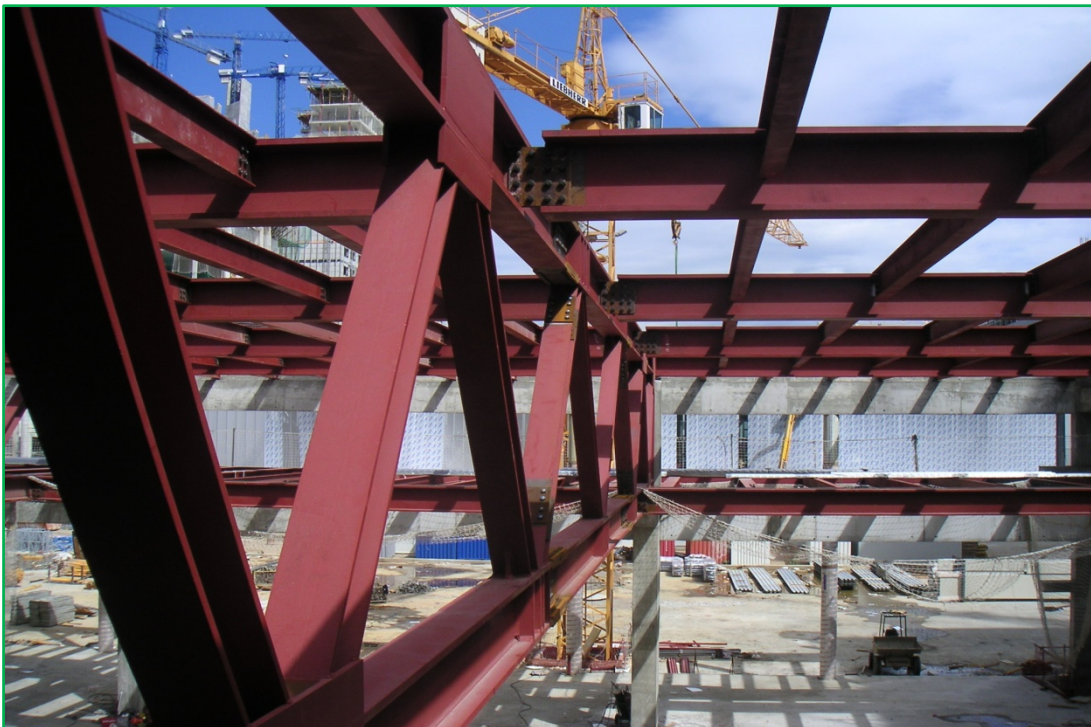
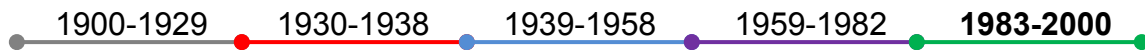


Figura 5.22 Tipologia estructural. Zona fòrum Barcelona.



1983-2000	NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación
	EUROCÓDIGO 3. Proyecto de Estructuras de Acero. UNE-ENV 1993.

5.3. NORMATIVA OFICIAL

Arribats a aquest punt, s'ha cregut interessant parlar d'un precedent; el *Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación*, que encara que surti fora del Bloc temporal que ara s'estudia, se'ns dubte ha influït plenament en les normatives que a continuació es destacaran.

MINISTERIO DE LA VIVIENDA

Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación

Publicación: BOE núm. 163, de 9 de julio de 1977

Referencia: BOE-A-1977-15613

Ministerio de la Vivienda

Páginas: 15443 a 15444³³

Conscients que el sector constructiu prenia cada vegada més força, una de les tasques dels Ministeris era la de garantir la seguretat i desfer totes les possibles ambigüitats que sorgissin quant els tècnics apliquessin les normatives d'obligat compliment. Cert és que ja existia, com s'ha vist al BLOC precedent la sèrie **MV**, però malgrat tot la disposició afegia;

48

Actualmente la normativa que es aplicable a la edificación se compone de un conjunto de disposiciones de rango administrativo diferente, **sin que aparezca perfectamente delimitada la frontera entre lo obligatorio y lo facultativo**, fuente todo ello de dificultades interpretativas que pueden afectar directamente a todas las personas relacionadas con el proceso de la edificación y con el uso de los edificios.

I estableix;

Por ello, se hace **necesario crear un marco jurídico que ordene la normativa de la edificación.**

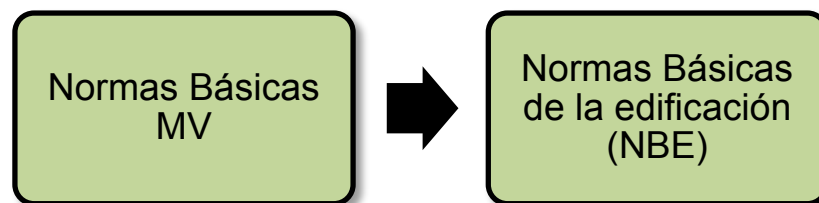
³³ <http://www.boe.es/boe/dias/1977/07/09/pdfs/A15443-15444.pdf>

Son normas básicas de la edificación (**NBE**), las que a partir de los fundamentos del conocimiento científico y tecnológico, **establecen las reglas necesarias para su correcta aplicación en el proyecto y la ejecución de los edificios.**

Tienen como finalidad fundamental defender la seguridad de las personas, establecer las restantes condiciones mínimas para atender las exigencias humanas y proteger la economía de la sociedad.

Como consecuencia de estos fines, las NBE son normas de obligado cumplimiento para todos los proyectos y las obras de edificación.

Així doncs;



49

Cal remarcar que dins el mateix real decret es fa menció de les **NTE**³⁴;

El ministerio de la vivienda continuará la elaboración de las normas tecnológicas de la edificación (NTE), hasta completar el conjunto de normas previsto en su anexo³⁵.

S'incideix en el fet que les NTE no tenien caràcter obligatori; només servien com a desenvolupament de les citades NBE.

³⁴ Normas Tecnológicas de la Edificación.

³⁵ <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1973-55>

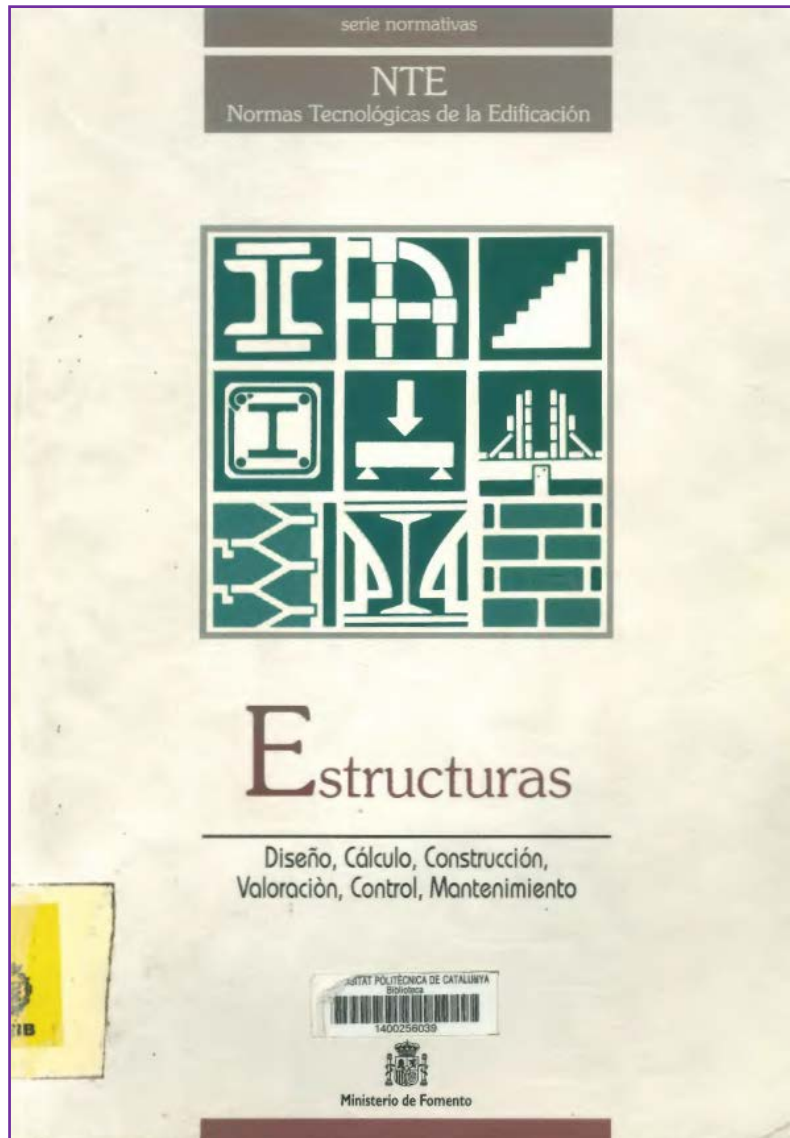
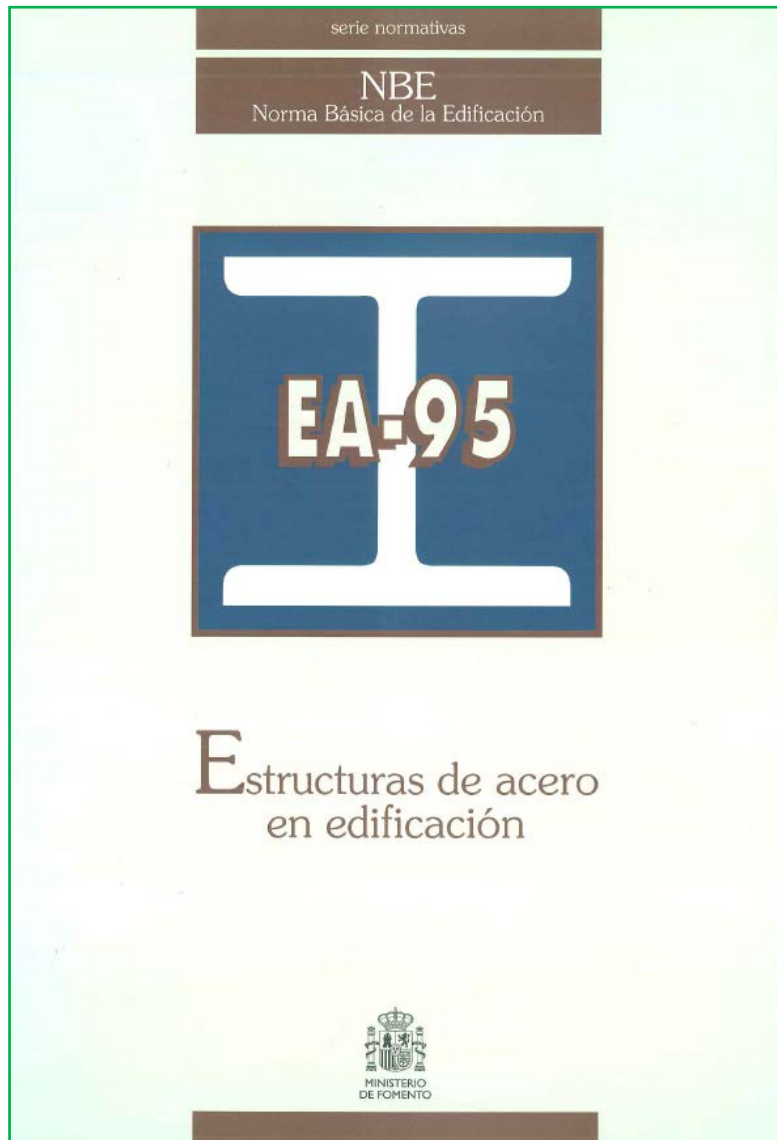


Figura 5.23 Normas Tecnológicas de la Edificación.

Com a dada històrica ens podem referir a unes solucions homologades, que el mateix Reial Decret presentava; les normes **SHE**;

La dirección general de arquitectura y tecnología de la edificación elaborará y homologará soluciones homologadas de edificación (SHE) cuya utilización correcta garantiza el cumplimiento y la superación de los niveles mínimos que establecen las NBE.

Tot i això, en honor a la veritat, cal dir que les fonts consultades remarquen que el seu desenvolupament mai es dugué a terme.



5.3.1. NBE EA-95. Estructuras de acero en edificación.

**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO
AMBIENTE**

Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 "ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICACIÓN".

Publicación: BOE número 16 de 18/1/1996

Referencia: BOE-A-1996-1223

Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente

Páginas: 1414 a 1620³⁶

Estructura

Parte 1.

Introducción.

Parte 2.

Productos de acero para estructuras.

Parte 3.

Cálculo de las estructuras de acero laminado.

Parte 4.

Cálculo de las piezas de chapa conformada.

Parte 5.

Ejecución de las estructuras de acero.

Apéndice 1.

Normas UNE de referencia para estructuras de acero.

Apéndice 2.

Observaciones a la notación empleada.

El Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación, dispone que son normas básicas de la edificación (**NBE**), las que a partir de los fundamentos del conocimiento científico y tecnológico establecen las reglas necesarias para su correcta aplicación en el proyecto y ejecución de

³⁶ <http://www.boe.es/boe/dias/1996/01/18/pdfs/A01414-01620.pdf>

los edificios. Dado que estas normas **tienen como finalidad fundamental la de defender la seguridad de las personas, establecer las restantes condiciones mínimas para atender las exigencias humanas y proteger la economía de la sociedad, las normas básicas de la edificación son normas de obligado cumplimiento para todos los proyectos y obras de edificación.**

Hasta la fecha, la normativa de obligado cumplimiento relacionada con las estructuras de acero en la edificación ha estado formada por una serie dispersa de normas **NBE MV** aprobadas entre los años 1966 y 1982³⁷. Por ello, resulta aconsejable, para su más fácil manejo, **la agrupación de todas esas normas en una sola norma básica de la edificación con estructura similar a la de otras normas básicas, a la vez que se introducen algunas modificaciones que resultan necesarias**, particularmente, en relación con las referencias a normas **UNE** que a lo largo de estos años han sufrido revisiones y modificaciones, consecuencia, en algunos casos, de la incorporación de normas europeas.

Abast de la norma

El objeto de esta norma es establecer las prescripciones técnicas suficientes para proporcionar la confianza adecuada respecto a la seguridad de las estructuras de acero en la edificación.

Se refunden y ordenan en esta norma NBE EA-95 la serie completa de normas relativas a estructuras de acero NBE-MV 102 a NBE-MV 111.

Esta norma debe aplicarse al proyecto y a la ejecución, tanto en taller como en obra, de las estructuras de acero en la edificación o de sus elementos estructurales.

El autor del proyecto de una edificación, con estructura o elementos estructurales proyectos de acero, está obligado a conocer y a tener en cuenta esta norma; no obstante, podrá adoptar prescripciones diferentes a las

³⁷ Referenciadas al BLOC IV.

establecidas en ella, en cuyo caso se justificará documentalmente que las soluciones adoptadas no disminuyen el nivel de seguridad establecido por la norma.

Propuesta del Ministro de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, y previa deliberación del Consejo de Ministros

Deroga

A la entrada en vigor de este Real Decreto quedarán derogadas las siguientes disposiciones:

a) Decreto 1851/1967, de 3 de junio, por el que se aprueba la Norma MV 104-1966 **“Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación”**.

b) Decreto 685/1969, de 30 de enero, por el que se aprueban las Normas MV 105-1967 **“Roblones de acero”**, MV 106-1968 **“Tornillos ordinarios y calibrados, tuercas y arandelas de acero para estructuras de acero laminado”** y MV 107-1968 **“Tornillos de alta resistencia y sus tuercas y arandelas”**.

c) Decreto 1353/1973, de 12 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica MV 103-1973 **“Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación”**.

d) Real Decreto 2899/1976, de 16 de septiembre, por el que se aprueba la Norma Básica MV 102-1975 **“Acero laminado para estructuras de edificación”**.

e) Real Decreto 3253/1976, de 23 de diciembre, por el que se aprueba la Norma Básica MV 108-1976 **“Perfiles huecos de acero para estructuras de edificación”**.

f) Real Decreto 3180/1979, de 7 de diciembre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 109-1979 **“Perfiles conformados de acero para estructuras de edificación”**.

g) Real Decreto 2169/1981, de 22 de mayo, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 111-1980 **“Placas y paneles de chapa conformada de acero para la edificación”**.

h) Real Decreto 2048/1982, de 28 de mayo, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 110-1982 “**Cálculo de las piezas de chapa conformada de acero en edificación**”.

Igualmente, quedarán derogadas cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo establecido en este Real Decreto.

Derogada

Se deroga por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el **Código Técnico de la Edificación**.³⁸

Firma

Dado en Madrid a 10 de noviembre de 1995.

JUAN CARLOS R.

El Ministro de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente,

JOSE BORRELL FONTELLES

³⁸ **Publicación:** BOE número 74 de 28/3/2006

Referencia: BOE-A-2006-5515

Ministerio de Vivienda

Páginas: 11816 a 11831

TRIBUNAL CONSTITUCIONAL

- 1220** ACUERDO de 16 de enero de 1996, del Pleno del Tribunal Constitucional, por el que se habilita, para la presentación en el Registro General del Tribunal del recurso de amparo electoral, el día 11 de febrero de 1996.

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 49,3 y 4 y 119 de la Ley Orgánica 5/1985, de 19 de junio, del Régimen Electoral General, y 8 del Acuerdo del Pleno del Tribunal Constitucional de 23 de mayo de 1986 («Boletín Oficial del Estado» del 24), y a los solos efectos de la presentación de recurso de amparo electoral, el Pleno ha acordado:

Artículo 1.

El Registro General del Tribunal Constitucional estará abierto el día 11 de febrero de 1996, desde las nueve treinta a las trece treinta horas, en la sede del mismo, calle Doménico Scalatti, número 6, de esta villa.

Artículo 2.

El presente Acuerdo entrará en vigor el día de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Madrid, 16 de enero de 1996.—El Presidente del Tribunal Constitucional,

RODRIGUEZ BEREJO

MINISTERIO DE DEFENSA

- 1221** ORDEN 5/1996, de 11 de enero, por la que se amplía la Orden 124/1995, de 8 de septiembre, sobre Registros Generales existentes en el Ministerio de Defensa.

La Orden 124/1995, de 8 de septiembre, estableció la lista de los Registros Generales que, a los efectos de lo preceptuado por el artículo 38 de la Ley 30/1992, de 16 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, debían tener tal consideración en el ámbito del Ministerio de Defensa.

A la citada lista, es necesario añadir los organismos autónomos «Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo» y «Servicio Militar de Construcciones», que también precisan contar con un registro general.

En su virtud, previa aprobación del Ministro para las Administraciones Públicas, dispongo:

Primero.—El apartado 5 del punto primero de la Orden 124/1995, de 8 de septiembre, por la que se regulan los Registros Generales existentes en el Ministerio de Defensa, queda ampliado y modificado en los términos siguientes:

«5.6. El Registro de Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo.

«5.7. El Registro del Servicio Militar de Construcciones.

«5.8. Los Registros de las Delegaciones Territoriales de dichos organismos autónomos.»

Segundo.—La presente Orden entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Madrid, 11 de enero de 1996.

SUAREZ PERTIERRA

MINISTERIO DE ECONOMIA Y HACIENDA

- 1222** CORRECCION de errores de la Orden de 18 de diciembre de 1995 por la que se fija el contravalor en pesetas de la unidad de cuenta europea (ECU), a los efectos de la aplicación de las franquicias aduaneras y de las exenciones del Impuesto sobre el Valor Añadido correspondientes a las importaciones de bienes con ocasión de matrimonio, importaciones de bienes de escaso valor, importaciones de bienes en régimen de viajeros, importaciones de pequeños envíos y entregas de bienes efectuadas a viajeros en tiendas libres de impuestos con ocasión de un viaje intracomunitario.

Advertidos errores en la publicación de la Orden de 18 de diciembre de 1995 por la que se fija el contravalor en pesetas de la unidad de cuenta europea (ECU), a los efectos de la aplicación de las franquicias aduaneras y de las exenciones del Impuesto sobre el Valor Añadido correspondientes a las importaciones de bienes con ocasión de matrimonio, importaciones de bienes de escaso valor, importaciones de bienes en régimen de viajeros, importaciones de pequeños envíos y entregas de bienes efectuadas a viajeros en tiendas libres de impuestos con ocasión de un viaje intracomunitario, inserta en el «Boletín Oficial del Estado» número 1, de fecha 1 de enero de 1996, se transcribe a continuación la oportuna rectificación:

En la página 5, segunda columna, número tercero, letra a), donde dice: «90 ECU = 14.600 pesetas», debe decir: «90 ECU = 14.900 pesetas».

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE

- 1223** REAL DECRETO 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación».

El Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación, dispone que son normas básicas de la edificación (NBE), las que a partir de los fundamentos del conocimiento científico y tecnológico establecen las reglas necesarias para su correcta aplicación en el proyecto y ejecución de los edificios. Dado que estas normas tienen como finalidad fundamental la de defender la seguridad de las personas, establecer las restantes condiciones mínimas para atender las exigencias humanas y proteger la economía de la sociedad, las normas básicas de la edificación son normas de obligado cumplimiento para todos los proyectos y obras de edificación.

Hasta la fecha, la normativa de obligado cumplimiento relacionada con las estructuras de acero en la edificación ha estado formada por una serie dispersa de normas NBE MV aprobadas entre los años 1966 y 1982. Por ello, resulta aconsejable, para su más fácil manejo, la agrupación de todas esas normas en una sola norma básica de la edificación con estructura similar a la de

Figura 5.24 Real Decreto 1829/1995 por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 Estructuras de acero en edificación.

otras normas básicas, a la vez que se introducen algunas modificaciones que resultan necesarias, particularmente, en relación con las referencias a normas UNE que a lo largo de estos años han sufrido revisiones y modificaciones, consecuencia, en algunos casos, de la incorporación de normas europeas. Esta agrupación constituye un paso previo al estudio y adaptación de esta norma al «Eurocódigo para las estructuras de acero», norma europea con carácter aún experimental, que habrá de realizarse con la participación de los sectores públicos y privados afectados.

Por todo ello, este Real Decreto tiene por objeto aprobar la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación», en la que se refunden y ordenan en una sola norma básica de las normas básicas de la edificación (NBE) siguientes:

- a) NBE MV 102-1975 «Acero laminado para estructuras de edificación».
- b) NBE MV 103-1972 «Cálculo de estructuras de acero laminado en edificación».
- c) NBE MV 104-1966 «Ejecución de las estructuras de acero laminado en la edificación».
- d) NBE MV 105-1967 «Roblones de acero».
- e) NBE MV 106-1968 «Tornillos ordinarios y calibrados, tuercas y arandelas de acero para estructuras de acero laminado».
- f) NBE MV 107-1968 «Tornillos de alta resistencia y sus tuercas y arandelas».
- g) NBE MV 108-1976 «Perfiles huecos de acero para estructuras de edificación».
- h) NBE MV 109-1979 «Perfiles conformados de acero para estructuras de edificación».
- i) NBE MV 110-1982 «Cálculo de las piezas de chapa conformada de acero en edificación», y
- j) NBE MV 111-1980 «Placas y paneles de chapa conformada de acero para la edificación».

Finalmente, es de hacer constar que en la tramitación de este Real Decreto se ha cumplido el procedimiento de información en materia de normas y reglamentaciones técnicas establecido en la Directiva 83/189/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de marzo, y en el Real Decreto 1168/1995, de 7 de julio.

En su virtud, a propuesta del Ministro de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 10 de noviembre de 1995,

DISPONGO:

Artículo único.

Se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación», que se incluye en el anejo a este Real Decreto.

Disposición transitoria única.

No será obligatoria la aplicación de la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación» a aquellos edificios que a la fecha de entrada en vigor de este Real Decreto estén construyéndose, tengan concedida licencia de edificación, o sus proyectos

estén ya aprobados por las Administraciones públicas competentes o visados por Colegios Profesionales.

Disposición derogatoria única.

Sin perjuicio de lo dispuesto en la disposición transitoria única, a la entrada en vigor de este Real Decreto quedarán derogadas las siguientes disposiciones:

- a) Decreto 1851/1967, de 3 de junio, por el que se aprueba la Norma MV 104-1966 «Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación».
- b) Decreto 685/1969, de 30 de enero, por el que se aprueban las Normas MV 105-1967 «Roblones de acero», MV 106-1968 «Tornillos ordinarios y calibrados, tuercas y arandelas de acero para estructuras de acero laminado» y MV 107-1968 «Tornillos de alta resistencia y sus tuercas y arandelas».
- c) Decreto 1353/1973, de 12 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica MV 103-1973 «Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación».
- d) Real Decreto 2899/1976, de 16 de septiembre, por el que se aprueba la Norma Básica MV 102-1975 «Acero laminado para estructuras de edificación».
- e) Real Decreto 3253/1976, de 23 de diciembre, por el que se aprueba la Norma Básica MV 108-1976 «Perfiles huecos de acero para estructuras de edificación».
- f) Real Decreto 3180/1979, de 7 de diciembre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 109-1979 «Perfiles conformados de acero para estructuras de edificación».
- g) Real Decreto 2169/1981, de 22 de mayo, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 111-1980 «Placas y paneles de chapa conformada de acero para la edificación».
- h) Real Decreto 2048/1982, de 28 de mayo, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE MV 110-1982 «Cálculo de las piezas de chapa conformada de acero en edificación».

Igualmente, quedarán derogadas cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo establecido en este Real Decreto.

Disposición final primera.

Se faculta al Ministro de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente para modificar, cuando proceda, las referencias a las normas UNE que figuran en el apéndice 1 de la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95 «Estructuras de acero en edificación», aprobada por este Real Decreto.

Disposición final segunda.

Este Real Decreto entrará en vigor a los tres meses de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Dado en Madrid a 10 de noviembre de 1995.

JUAN CARLOS R.

El Ministro de Obras Públicas,
Transportes y Medio Ambiente,
JOSE BORRELL FONTELLES

Figura 5.25 Real Decreto 1829/1995 por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 Estructuras de acero en edificación.

Por ello, resulta aconsejable, para su más fácil manejo, **la agrupación de todas esas normas en una sola norma básica de la edificación** con estructura similar a la de otras normas básicas, a la vez que se introducen algunas modificaciones que resultan necesarias.

Aquesta sentència extreta de la documentació anterior vindria a definir **fonamentalment** el què seria la normativa **EA-95**; una recopilació - agrupació de les existents **MV**. Tècnics consultats deien que el fet de agrupar tota el tema normatiu en un sola presentació va simplificar el volum de documentació que calia consultar o dur a sobre en visita a obra.

Cert és, com hem vist, que la normativa **MV** més emprada era la **MV 103** i que era aquesta la fonamentalment consultada però, malgrat tot, sovint calia fer ús d'alguna altra. Aquest fet fou el principal motiu conjuntament amb la constatació que havien passat força anys des de la formulació de les primeres **MV** i per tant calia actualitzar-ne algun aspecte. Amb aquesta premissa es publicà aquesta normativa de 307 pàgines.

Es creu que, en ser fonamentalment una obra recopilatòria, no cal passar a detallar-ne cada un dels apartats doncs fonamentalment fora el mateix que es feu en el BLOC IV en parlar de les normes **MV**. Novament es refereix al lector interessat a l'adreça electrònica indicada a l'inici on hi consta tota la normativa segons la publicà el BOE.

Sense entrar en detall en el desenvolupament total de l'índex (consultable al web citat) es pot notar que aquest consta de:

PARTE 1.- INTRODUCCIÓN

PARTE 2.- PRODUCTOS DE ACERO PARA ESTRUCTURAS

Anejos de la Parte 2

PARTE 3.- CÁLCULO DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO LAMINADO

Anejos de la Parte 3

PARTE 4.- CÁLCULO DE LAS PIEZAS DE CHAPA

Anejos de la Parte 4

PARTE 5.- EJECUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO

Apéndices



Los Eurocódigos estructurales son un conjunto de normas europeas de carácter voluntario, encargadas por la Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización, CEN, que proporcionan una serie de métodos comunes para calcular la resistencia mecánica de los elementos que desempeñan una función estructural en una obra de construcción.

5.3.2. EUROCÓDIGO 3. Proyecto de Estructuras de Acero.

L'anterior frase que precedeix l'estudi dels Eurocodis, extreta de la pàgina oficial del *Ministerio de Fomento*³⁹ serveix per introduir el què han significat (i signifiquen) els Eurocodis; *proporcionan una serie de métodos comunes para calcular la resistencia mecánica de los elementos que desempeñan una función estructural en una obra de construcción*. D'ella en podem destacar dues consideracions. Primerament la idea de **mètodes comuns** (fins ara només parlàvem de normativa de cada país) i segon, la de **proporcionar eines pel càlcul resistiu** dels diferents elements estructurals (com de fet era d'esperar).

Malgrat que només estudiarem **l'Eurocodi 3** en el treball que ens abasta, val la pena citar-los tots per veure la nova realitat normativa que aporten al càlcul estructural.

El mateix *Ministerio* ens indica⁴⁰,

Los Eurocódigos EC0 de Bases de cálculo, EC1 Acciones en estructuras, EC7 Proyecto geotécnico y EC8 Proyecto para la resistencia al sismo de las estructuras no tienen aplicación si no es por referencia en los Eurocódigos **EC2 Proyecto de estructuras de hormigón, EC3 de acero, EC4 mixtas, EC5 de madera, EC6 de fábrica y EC9 de aleación de aluminio**.

Esto hace que para la aplicación de los Eurocódigos se hayan creado lo que se denominan **conjuntos o paquetes de normas**.

Conjunto o paquete es el grupo de normas que se necesita para poder efectuar un determinado cálculo (para el cálculo de un edificio, puente, silo, tanque o conducción, por ejemplo).

Estos son los siguientes:

³⁹http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/MARCADOCE_EUROCODIGOS/EUROCOD/.

⁴⁰http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/MARCADOCE_EUROCODIGOS/EUROCOD/CONJEUROCOD/default.htm

•Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón

- ✓ Conjunto 2/1. Edificios, excluyendo puentes y estructuras de contención y que retienen líquidos.
- ✓ Conjunto 2/2. Puentes
- ✓ Conjunto 2/3. Depósitos y estructuras de contención y que retienen líquidos

•Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

- ✓ Conjunto 3/1. Edificios y obras de ingeniería civil, con exclusión de puentes, silos, depósitos y conducciones, estructuras de acero para sujeción de grúas y torres y mástiles
- ✓ Conjunto 3/2. Puentes con estructura acero
- ✓ Conjunto 3/3. Silos, depósitos y conducciones de acero
- ✓ Conjunto 3/4. Pilotes y tablestacados
- ✓ Conjunto 3/5. Estructuras para la sujeción de grúas
- ✓ Conjunto 3/6. Torres y mástiles

•Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero

- ✓ Conjunto 4/1. Edificios y obras de ingeniería civil, con excl. de puentes
- ✓ Conjunto 4/2. Puentes

•Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera

- ✓ Conjunto 5/1. Edificios y obras de ingeniería civil, con excl. de puentes
- ✓ Conjunto 5/2. Puentes

•Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica (albañilería)

- ✓ Conjunto 6/1. Edificios y obras de ingeniería civil, con excl. de puentes
- ✓ Conjunto 6/2. Cálculo simplificado

•Eurocódigo 9: Proyecto de estructuras de aleación de aluminio

- ✓ Conjunto 9/1. Todo excepto fatiga
- ✓ Conjunto 9/2. Fatiga

Els precedents...

Dado que el **Eurocódigo 3** es uno de los documentos básicos para la elaboración de las normas europeas EN relativas a Construcciones Metálicas, así como una fuente fundamental para los estructuralistas que trabajan con acero, se ha creído conveniente publicar la traducción de una de las versiones existentes de dicho documento, en concreto la del borrador final de diciembre de 1988 y distribuirla a los "ingenieros de enlace" en febrero de 1989.

Amb aquesta sentència es prologava el manual de **Proyectos de Estructuras Metálica. Eurocódigo nº 3**.



Figura 5.26 Proyectos de Estructuras Metálica. Eurocódigo nº 3.

Conscient que la normativa europea prendria cada vegada més empenta i, en no estar encara publicada a l'estat espanyol, es presentà una traducció (no oficial de la mateixa) per a que les persones dedicades al càlcul d'estructures d'acer tinguessin un primer contacte tot i esperant les corresponents disposicions oficials.

El sumari venia donat per,

<p>1. INTRODUCCION</p> <p>1.1. Campo de aplicación. 1.2. Distinción entre reglas principales y de aplicación. 1.3. Hipótesis. 1.4. Definiciones. 1.5. Unidades S. I. 1.6. Símbolos utilizados en la Parte 1 del Eurocódigo 3.</p>	<p>6. UNIONES SOMETIDAS A CARGAS ESTATICAS</p> <p>6.1. Bases. 6.2. Intersecciones. 6.3. Uniones solicitadas a cortadura y sometidas a vibraciones y/o cargas alternativas. 6.4. Clasificación de las uniones. 6.5. Uniones realizadas con tornillos, roblones o pernos. 6.6. Uniones soldadas. 6.7. Uniones híbridas. 6.8. Uniones embridadas. 6.9. Uniones viga-pilar. 6.10. Uniones de vigas de celosía con perfiles huecos. 6.11. Bases de los pilares.</p>
<p><i>CALCULO</i></p> <p>2. BASES DE PROYECTO</p> <p>2.1. Requisitos básicos. 2.2. Definiciones y clasificaciones. 2.3. Requisitos de proyecto. 2.4. Durabilidad.</p>	<p>7. FABRICACION Y MONTAJE</p> <p>7.1. Generalidades. 7.2. Especificacion de proyecto. 7.3. Restricciones de fabricación. 7.4. Preparación del material. 7.5. Uniones atornilladas. 7.6. Uniones soldadas. 7.7. Tolerancias. 7.8. Inspecciones y ensayos.</p>
<p>3. MATERIALES</p> <p>3.1. Generalidades. 3.2. Acero estructural. 3.3. Dispositivos de unión.</p>	<p>8. PROYECTO ASISTIDO POR ENSAYOS</p>
<p>4. ESTADOS LIMITES DE SERVICIO</p> <p>4.1. Bases. 4.2. Deformaciones. 4.3. Efectos dinámicos.</p>	<p>9. FATIGA</p> <p>9.1. Campo de aplicación. 9.2. Procedimientos para determinar la fatiga. 9.3. Cargas de fatiga. 9.4. Espectro de tensiones de fatiga. 9.5. Resistencia a la fatiga. 9.6. Modificaciones de la resistencia a la fatiga. 9.7. Factores de seguridad parcial. 9.8. Tablas de clasificación.</p>
<p>5. ESTADO LIMITE ULTIMO</p> <p>5.1. Bases. 5.2. Cálculo de esfuerzos internos y momentos. 5.3. Clasificación de las secciones transversales. 5.4. Resistencia de las secciones transversales. 5.5. Resistencia de los elementos estructurales al pandeo. 5.6. Resistencia a pandeo cortante. 5.7. Vigas armadas. 5.8. Pandeo del alma y abollamiento. 5.9. Piezas compuestas comprimidas. 5.10. Estructuras trianguladas.</p>	

Figura 5.27 Sumario. Proyectos de Estructuras Metálica. Eurocódigo nº 3.

Es publicava en sèrie d'entregues a la revista SERCOMETAL que permetien, a posteriori, l'agrupació de totes ells per a fer-ne un corresponent llibret.

Esta revista surgió a iniciativa del sector de constructores metálicos asociados en **SERCOMETAL** y no tiene otro objetivo que la promoción del acero y la divulgación de técnicas de conocimiento que ayuden a incrementar la utilización de dicho material en nuestro país. Una de las formas de contribuir a dicho **objetivo consiste en difundir la información técnica disponible**, de forma que llegue al mayor número de interesados (ingenieros, arquitectos y calculistas en general) posible.



Figura 5.28 Revista **SERCOMETAL**. Construcciones Metálicas y Calderería.

Tot i això remarquen dues premisses a tenir en compte;

Esta versión española no es oficial y, por tanto, **no sustituirá, en ningún caso, a la versión original del Eurocódigo 3** tomada de referencia y, mucho menos, a la quien su día se edite del mismo.

I la segona, molt curiosa, que només es pot entendre si tenim present la publicació periòdica de la normativa dins la revista,

La serie de traducciones podría **verse interrumpida por falta de interés de los lectores** u otras causas que así lo justifiquen

Tot i aquesta primera gran aposta pels **Eurocodis** el material més emprat pels calculistes continuava essent la normativa **EA-95**. Malgrat això, i veient cada vegada més clara aquesta conjunció europea que s'estava duent ja des de molts àmbits, l'any 1996 (febrer) es publica una traducció de la versió original anglesa de la normativa (encara experimental) per part de l'entitat AENOR (Associació Espanyola de Normalització i Certificació)⁴¹.

Sin ser una norma obligatoria y aún teniendo, además, **carácter experimental**, constituye, sin duda, un documento técnico de indudable importancia para el sector de la construcción que, en su día, completada con todas sus partes **llegará a ser una norma europea** que facilitará la libre circulación de personas y de productos de acero para la construcción dentro de la Unión Europea.

65

Novament es troba destacat el binomi *caràcter experimental - normativa amb futur* que trobem a la norma **UNE-ENV 1993-1-1**. Aquesta serà una constant en els materials fins l'arribada de la normativa **UNE-EN 1993-1-1** que ja no serà experimental.

La norma experimental en su versión española UNE-ENV 1993 **Proyecto de estructuras de acero Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación** contiene las bases para el Proyecto, las propiedades de los aceros, el cálculo de las secciones y de los elementos estructurales, así como las reglas de construcción y del control de calidad de estas estructuras.

⁴¹ De la informació de l'entitat AENOR, (<http://www.ca.aenor.es/aenor/aenor/historia/historia.asp>) recollim; AENOR es va constituir el 1986, coincidint amb la incorporació d'Espanya a la Comunitat Econòmica Europea.

Per concloure amb la següent afirmació⁴²;

En relación con las estructuras de acero, la normativa obligatoria en España ha estado formada por la serie de diez normas básicas **NBE-MV 102 a 111**, aprobadas entre los años 1966 y 1982: recientemente un Real Decreto ha aprobado la refundición de todas ellas en una sola norma **NBE-EA 95 Estructuras de acero en edificación** que constituye un paso previo a su necesaria actualización y su aproximación a este Eurocódigo, para cuyos trabajos se ha de contar con la participación de los sectores afectados.



Figura 5.29 EUROCÓDIGO 3. Proyecto de Estructuras de Acero.

⁴² Segons es recull de la *Dirección General para la Vivienda, el Urbanismo y la Arquitectura*; *Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente*.

Esta Norma Europea Experimental (ENV) ha sido aprobada por el CEN⁴³ el 1992-04-26 como una **norma experimental para su aplicación provisional**. El periodo de validez de esta **Norma ENV** está limitado inicialmente a tres años. Pasados dos años, los miembros de CEN enviarán sus comentarios, en particular sobre la posible conversión de la **Norma ENV en Norma Europea (EN)**.

Se permite mantener (en paralelo con la **Norma ENV**) las normas nacionales que estén en contradicción con la **Norma ENV** hasta que se adopte la decisión final sobre la posible conversión de la **Norma ENV en Norma EN**.

La versió que ens ocupa serà la **ENV 1193-1-1:1992** ja que la nostra temporalitat d'estudi acaba l'any 2000. Serà, per tant, aquesta normativa a la què ens referirem. Es compona del següent índex.

Preámbulo.

1. Introducción.
2. Bases de cálculo.
3. Materiales.
4. Estados límite de servicio.
5. Estados límite últimos.
6. Uniones sometidas a carga estática.
7. Fabricación y montaje.
8. Proyecto asistido por ensayos.
9. Fatiga.

ANEXO A. No consta !.

ANEXO B (Normativo). Normas de referencia.

ANEXO C (Informativo). Diseño contra la rotura frágil.

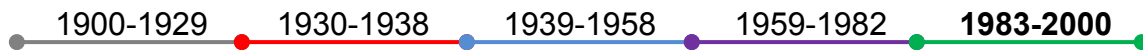
ANEXO E (Informativo). Longitud de pandeo de una pieza comprimida.

ANEXO F (Informativo). Pandeo lateral.

ANEXO J (Normativo). Uniones viga – pilar.

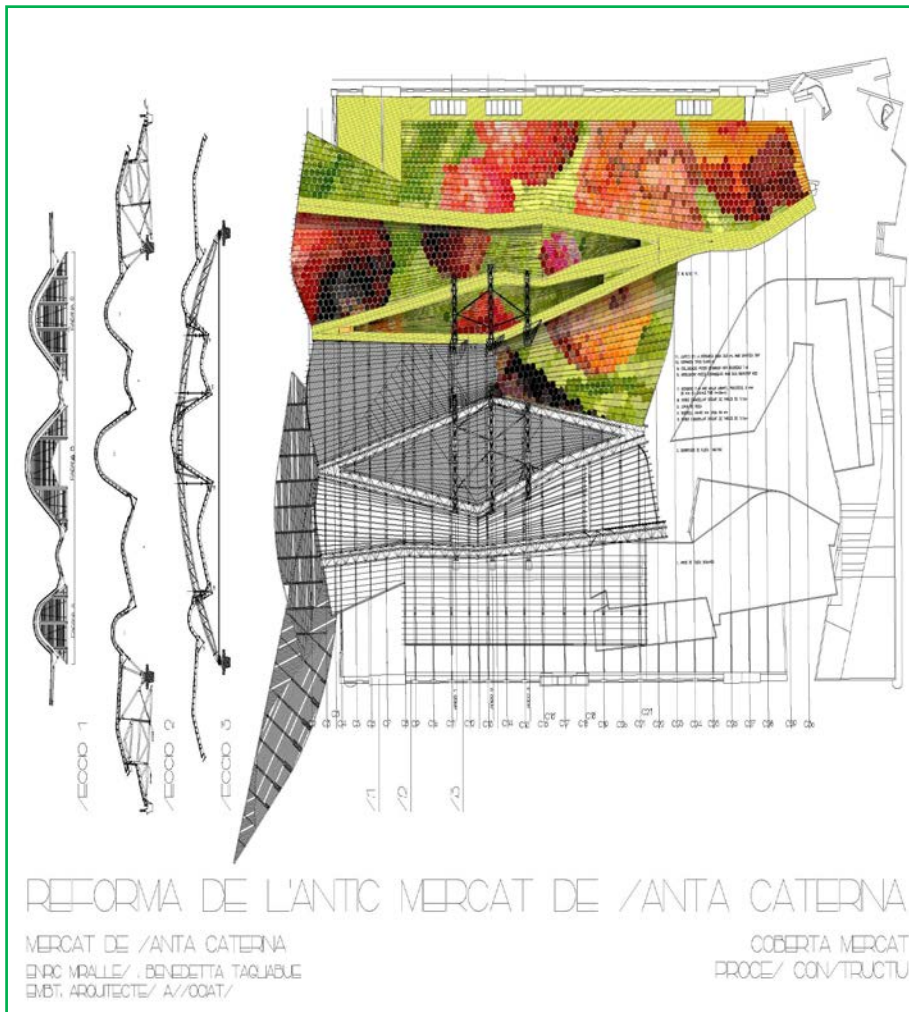
ANEXO K (Normativo). Uniones de perfiles huecos en las vigas de celosía.

⁴³ Comité Europeo de Normalización.



ANEXO L (Normativo). Cálculo y diseño de basas de soporte.
ANEXO M (Normativo). Método altern. para el cálculo de sold. de ángulo.
ANEXO Y (Informativo). Guía para los ensayos de carga.
Tablas.
Figuras.
Procedimientos.

Tal i com es pot veure és molt semblant a l'anterior sumari de la normativa presentada per SERCOMETAL.



5.4. TECNOLOGIA INDUSTRIAL



5.4.1. Tecnologia dels materials

L'any 1999 es publicà el *Prontuario de Estructuras Metálicas* per part del *Ministerio de Fomento*⁴⁴. En aquest cas ens trobem amb la cinquena edició d'un manual que figura, en primera edició, de l'any 1981. En aquesta darrera podem llegir al pròleg;

En el transcurso del tiempo, tanto la normativa como los perfiles de posible utilización en España han ido cambiando y por consiguiente hemos tenido que **ir adaptando el Prontuario a las nuevas circunstancias.**

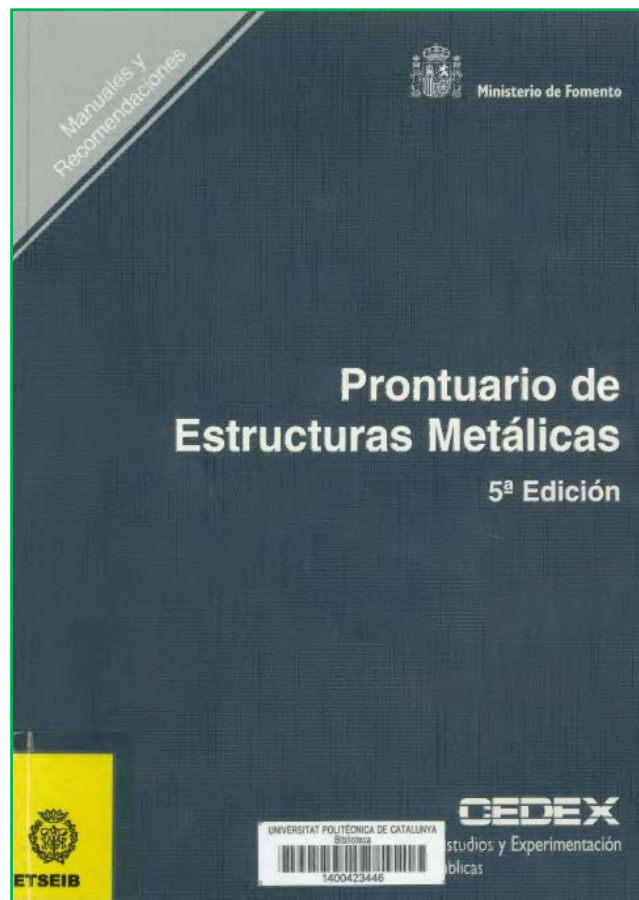


Figura 5.30 Prontuario de Estructuras Metálicas. 5ª edición. Ministerio de Fomento

Por ello ha aumentando considerablemente el tamaño del libro, pues existen partes que se adaptan a la normativa anterior, aun vigente, y a la que está acostumbrada una gran parte de los usuarios, y también a los procedimientos del EUROCÓDIGO 3.

⁴⁴ Prontuario de Estructuras Metálicas. 5ª edición. Ministerio de Fomento. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

És interessant fer-hi esment ja que, tal i com es recull al text previ, al període 1981-1999 s'hi poden trobar tant les referides normes **M.V.**, la **EA-95** i es comencen a esbossar els **Eurocodis**. És a dir que la publicació s'haurà d'adaptar a aquest fet normatiu. L'edició que ens ocupa és de maig 1999 però, tal i com s'intentarà reflectir encara cohabitaven les tres normatives.

A part d'aquest fet, cal remarcar que fou un material molt útil pel calculista ja que amb un llibre es recollien fórmules, normatives, taules de perfils entre d'altres. Tot i això s'inclou un apartat, 5.2, que malgrat semblar innecessari, es creu que és del tot rellevant; **les taules de conversió d'unitats**. Sovint, i el Promptuari és un exemple, ens trobem unitats diverses, tant referides a unitats de longitud, de força, de mòdul d'elasticitat,...És per tant útil, i professionals que s'han trobat a cavall de diferents normatives amb diferents unitats així ho reflecteixen, disposar d'un material que ràpidament permet el pas d'una a l'altra.

Términos	Unidades Actuales	Unidades SI	Sistema MKS al Sistema SI	Sistema SI al sistema MKS
Longitud	m, cm, mm	m, mm		
Masa	t, kg	t, kg		
Carga	kg t	N kN	1 kg = 10 N 1 t = 10 kN	1 N = 0,1 kg 1 kN = 0,1 t
Carga lineal	kg/m t/m	N/m kN/m	1 kg/m = 10 N/m 1 t/m = 10 kN/m	1 N/m = 0,1 kg/m 1 kN/m = 0,1 t/m
Carga superficial	kg/m ² t/m ²	N/m ² kN/m ²	1 kg/m ² = 10 N/m ² 1 t/m ² = 10 kN/m ²	1 N/m ² = 0,1 kg/m ² 1 kN/m ² = 0,1 t/m ²
Fuerza	kg, kp t	N kN	1 kg = 10 N 1 t = 10 kN	1 N = 0,1 kg 1 kN = 0,1 t
Momento	mkg mt	Nm kNm	1 mkg = 10 Nm 1 mt = 10 kNm	1 Nm = 0,1 kgm 1 kNm = 0,1 mt
Tensión	kg/cm ² kg/mm ² t/cm ²	N/mm ² N/mm ² kN/mm ²	1 kg/cm ² = 0,1 N/mm ² 1 kg/mm ² = 10 N/mm ² 1 t/cm ² = 0,1 kN/mm ²	1 N/mm ² = 10 kg/cm ² 1 N/mm ² = 0,1 kg/mm ² 1 kN/mm ² = 10 t/cm ²
Módulo de elasticidad E	kg/cm ²	kN/mm ²	2100000 kg/cm ² = 210 kN/mm ²	210 kN/mm ² = 2100000 kg/cm ²
Módulo transversal G	kg/cm ²	kN/mm ²	810000 kg/cm ² = 81 kN/mm ²	81 kN/mm ² = 810000 kg/cm ²
Densidad de masa	kg/dm ³ t/m ³	kg/m ³ Mg/m ³	1 kg/dm ³ = 1000 kg/m ³ 1 t/m ³ = 1 Mg/m ³	1 kg/m ³ = 0,001 kg/dm ³ 1 Mg/m ³ = 1 t/m ³
Resiliencia	mkg	J	1 mkg = 10 J	1 J = 0,1 mkg

Figura 5.31 Taula de conversió d'unitats (1 kg= 10 N; error 2%)

1ª PARTE: TABLAS DE PERFILES Y RESISTENCIAS

1. Tablas de perfiles

1.1. Perfiles simples laminados

1.2. Perfiles simples conformados en frío

- 1.3. Vigas armadas
 - 1.4. Chapas
 - 1.5. Perfiles compuestos
 - 1.6. Perfiles alveolados
 - 1.7. Tubos
 - 1.8. Tornillos
 - 1.9. Roblones
 - 1.10. Soldadura
 - 1.11. Carril para grúas y vigas RENFE
2. Tablas de resistencia
 - 2.1. Coeficientes ω para cálculo de pandeo
 - 2.2. Coeficientes X, curvas europeas de pandeo
 - 2.3. Acero estructural
 - 2.4. Resistencia a compresión
 - 2.5. Estructuras mixtas, conectadores
 - 2.6. Resistencia de tornillos

Aquesta primera part és un clar exemple que la normativa **EA-95** refon en gran part, tal i com hem vist, les normatives **M.V.**. Com exemple es pot fer notar que a l'apartat dedicat a la soldadura (1.10), són constants les cites a la normativa **M.V.104**. Fer esment també que els acers recollits són exclusivament els **A37**, **A42** i **A52** derogant totalment alguns emprats en normatives anteriors que tal i com havíem citat anaven quedant obsolets.

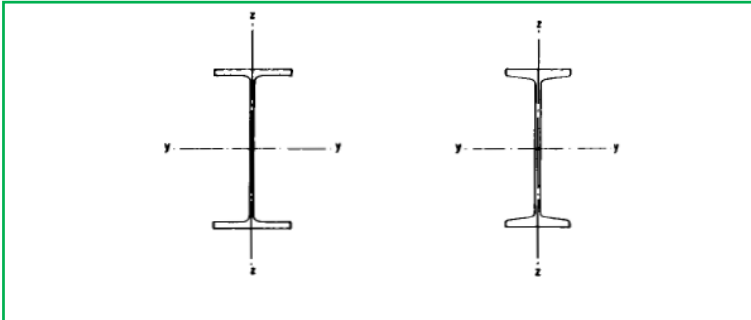
2ª PARTE: TABLAS DE PERFILES Y RESISTENCIAS (adaptadas a los Eurocódigos)

1. Tablas de perfiles
 - 1.1. Perfiles simples laminados
 - 1.2. Perfiles simples conformados en frío
 - 1.3. Vigas armadas
 - 1.4. Chapas
 - 1.5. Perfiles compuestos
 - 1.6. Perfiles alveolados
 - 1.7. Tubos
 - 1.8. Tornillos

- 1.9. Carril para grúas y vías RENFE
- 2. Tablas de resistencia
 - 2.1. Clasificación de los perfiles en clases
 - 2.2. Resistencia de cálculo respecto al Estado límite último de agotamiento
 - 2.3. Resistencia de cálculo respecto al Estado límite último de pandeo
 - 2.4. Estructuras mixtas, conectores
 - 2.5. Uniones atornilladas
 - 2.6. Uniones soldadas

Entrant en aquest apartat, i fet servir l'adaptació Eurocodi podem fer notar que les unitats es van reconduint, tal i com fèiem notar, cap les pròpies del Sistema Internacional. Així doncs veurem mm, mm⁴, kN/m entre d'altres.

També fer notar que el *Prontuario* presenta, en forma tabulada i pels distints materials (**Fe 360**, **Fe 430** i **Fe 510**), les distintes quatre classes amb que els perfils IPE, IPN, UPN, HEA, HEB i HEM són classificats.



h mm	IPE						IPN							
	Fe 360		Fe 430		Fe 510		Fe 360		Fe 430		Fe 510		Fe 360	
	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M
80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
140	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
160	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
180	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
220	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
240	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
260							1	1	1	1	1	1	1	1
270	2	1	2	1	3	1								
280							1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.32 Classificació dels perfils en classes.

3ª PARTE: FORMULARIO

- 3.1. Valores estadísticos⁴⁵ de algunas figuras geométricas
- 3.2. Esfuerzos y deformaciones
- 3.3. Vigas carrileras
- 3.4. Periodos propios de vibración de vigas

4ª PARTE: NORMAS

- 4.1. Norma Básica de la Edificación. NBE-EA-95⁴⁶. Estructuras de acero en la edificación. Parte 3ª "Cálculo de estructuras de acero laminado".
- 4.2. Norma NBE-AE-88⁴⁷. Acciones en la Edificación
- 4.3. Norma NCSE-94. Norma de Construcción Sismorresistente⁴⁸. Parte General y Edificación
- 4.4. Instrucción sobre Acciones en Puentes de Ferrocarril
- 4.5. Instrucción sobre Acciones en Puentes de Carretera

5ª PARTE: ANEJOS

- 5.1. Hormigón armado
- 5.2. Tablas de conversión de unidades.

Malgrat ser un Promptuari d'Estructures Metàl·liques, també s'i inclouen sis pàgines amb les principals taules de formigó armat que el projectista pot emprar en la vida professional.

⁴⁵ Es suposa que és un error i es vol dir **estàtics**.

⁴⁶ Real Decreto 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 "Estructuras de acero en edificación".

⁴⁷ Real Decreto 1370/1988, de 11 de noviembre, por el que se modifica parcialmente la Norma MV-101/1962, "Acciones en la Edificación", aprobada por Decreto 195/1963, de 17 de enero, y se cambia su denominación por Norma Básica de la Edifica NBE-AE/88, "Acciones en la Edificación".

<http://www.boe.es/boe/dias/1988/11/17/pdfs/A32720-32721.pdf>

⁴⁸ Real Decreto 2543/1994, de 29 de diciembre, por el que se aprueba la norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-94).

<http://www.boe.es/boe/dias/1995/02/08/pdfs/A03935-03980.pdf>



5.4.2. Tecnologia de fabricació i muntatge

Segons la **Norma ISO 2381/1 1974**, es defineix el **Control Numèric (CN)** com el control automàtic d'un procés, executat per un dispositiu que utilitza dades numèriques introduïdes mentre l'operació s'està realitzant.

Tal i com a l'inici es feia esment, la tecnologia de fabricació i muntatge que s'ha anat presentant viurà un important canvi amb la irrupció de la informàtica i de l'electrònica. Els sistemes clàssics que s'han anat descrivint es veuran influenciats molt ràpidament per la irrupció de l'anomenat **Control Numèric**. Tot i que òbviament no és el nostre objectiu ja que el control numèric ja pot esdevenir per ell mateix una línia de treball, sí que s'ha cregut, encara que molt breument, mostrar-lo per tal de completar la visió formulada de la fabricació dels principals elements descrits.

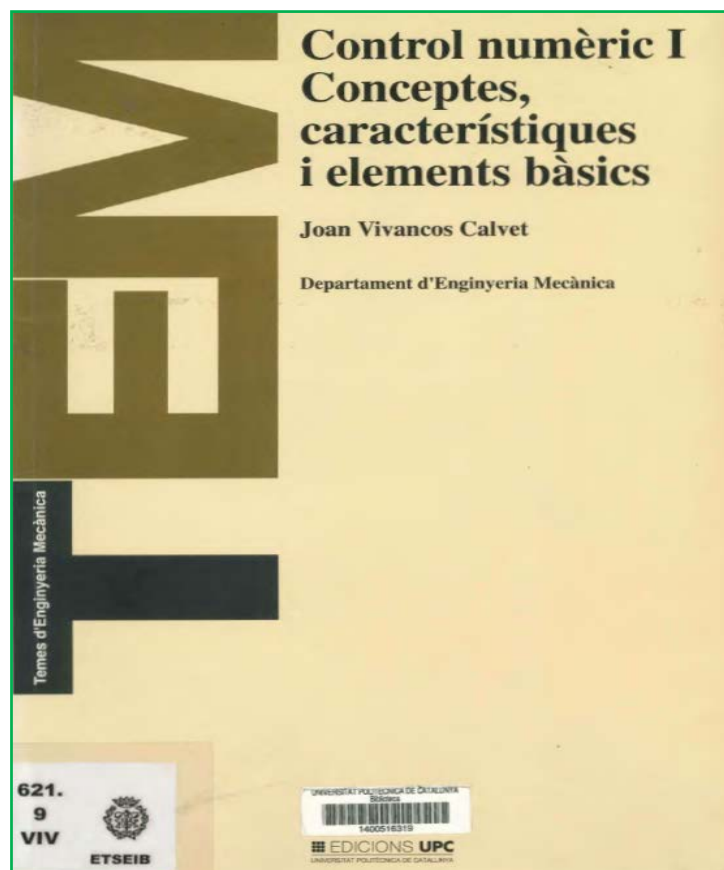


Figura 5.33 Control Numèric. Conceptes, característiques i conceptes bàsics.

Tot i que les fonts consultades parlen ja del control numèric a mitjans de segle XX (1942 -Bendix Corporation, 1953 -MIT,...), no serà fins la dècada dels 70 que el control numèric -amb l'eclosió de la informàtica i l'electrònica- tindrà

una rellevància cada vegada més gran. De fet el CN ha esdevingut un salt molt important en l'evolució dels processos de fabricació alhora que ha representat noves concepcions de l'automatització de les màquines.

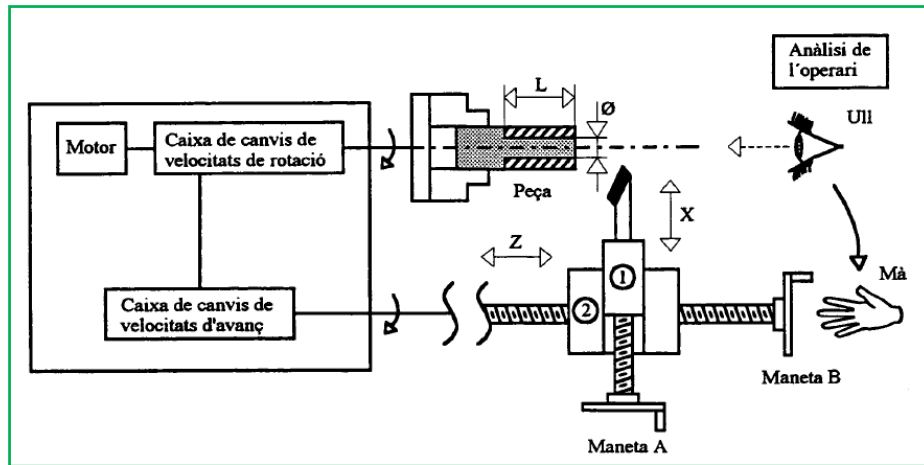


Figura 5.34 Esquema de funcionament d'un torn convencional.

Gràcies a l'aplicació del **CN** ha estat possible la creació de cèl·lules de fabricació flexible automatitzades i assistides per ordinadors,[...]. Al mateix temps aquestes cèl·lules poden estar integrades entre elles i dins el procés productiu global de l'empresa, sota una concepció **CIM** (Computer Integrated Manufacturing), **fabricació integrada per ordinador**⁴⁹.

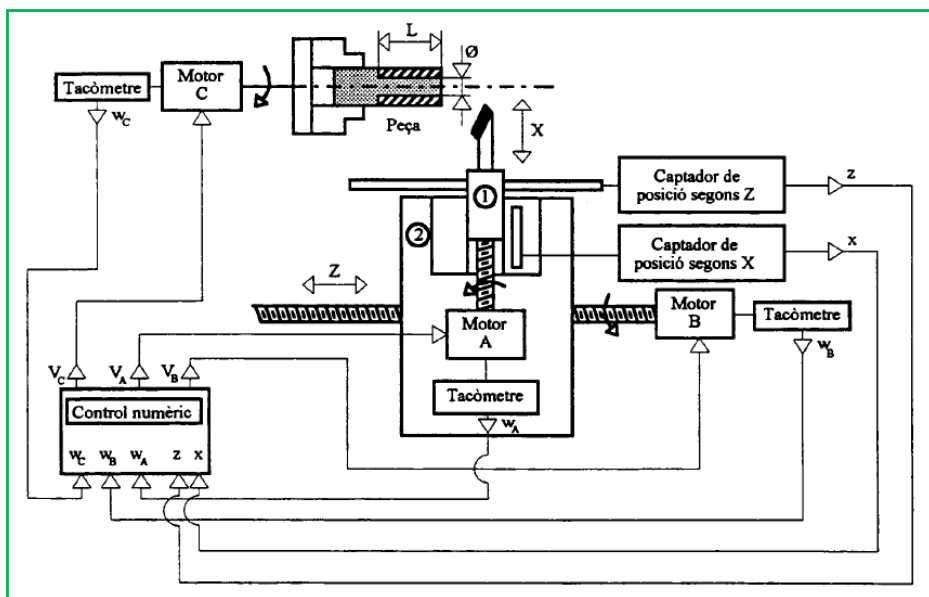


Figura 5.35 Esquema de funcionament d'un torn amb control numèric.

⁴⁹ Control numèric / Joan Vivancos Calvet. Barcelona: Edicions UPC, 1996

Cap al final del període que ens abasta la tecnologia de fabricació encara proporcionarà importants millores. D'entre les mateixes destaca el sistema anomenat BIM⁵⁰;

[...] est une technologie et des processus associés ensemble pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction⁵¹.



Figura 5.36 BIM; *Building Information Modeling*

Aquesta metodologia integra l'anàlisi, el disseny, els plànols i el CAD CAM generat -entre d'altres ítems.

També podem mencionar el procés de tall tèrmic;

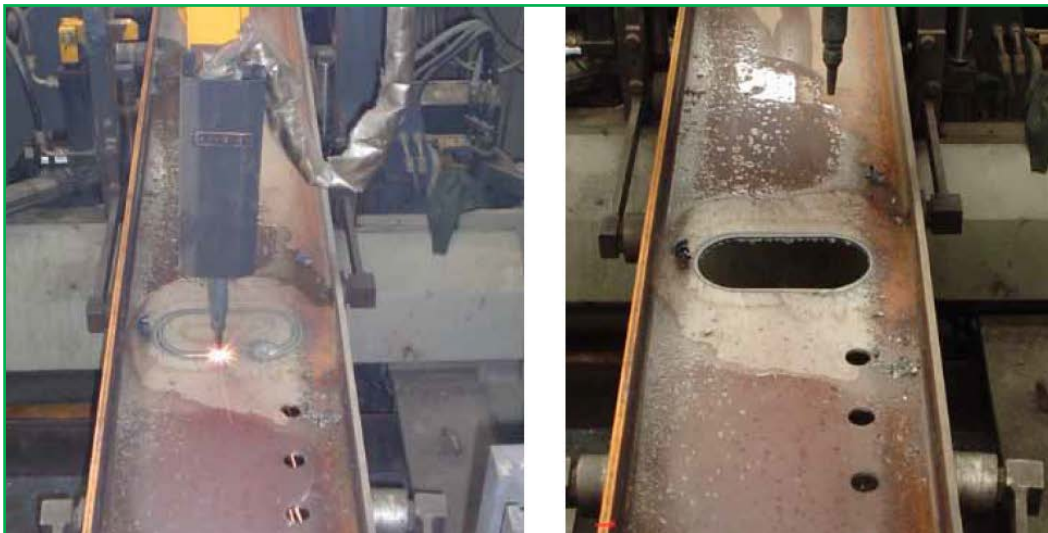


Figura 5.37 Procés de fabricació; tall tèrmic.

⁵⁰ *Building Information Modeling*.

⁵¹ Eastman, 2011

Així com el sistemes de punxonat i tallat amb plasma;

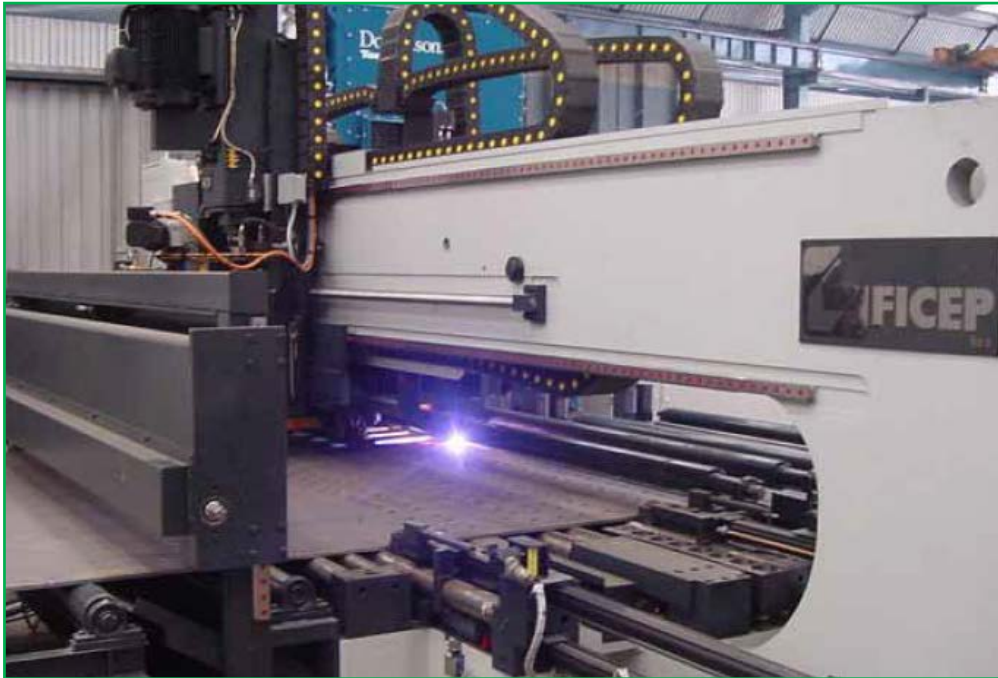


Figura 5.38 Procés de fabricació; tall amb plasma.

Aquests serien alguns dels nous sistemes de fabricació i muntatge que han aparegut els darrers anys.

Evidentment es podrien afegir d'altres -control numèric del punxonat, els robots de soldadura amb torxa- que se'ns dubte poden configurar un interessant element d'estudi de les formes de fabricació en les darreres èpoques -però que es creu que sortiria fora de l'abast del nostre estudi.

ANNEX- 1

Altres enfocaments en la presentació del Càlcul Matricial.

A la dècada dels anys vuitanta es presentà el llibre *Cálculo de estructuras* del Dr. Ramon Argüelles Álvarez, catedràtic de càlcul d'estructures de la E.T.S.I.M., publicat en dos volums. Tot i que ha esta un llibre bàsic pel calculista, farem èmfasi aquí només a la part de càlcul matricial.

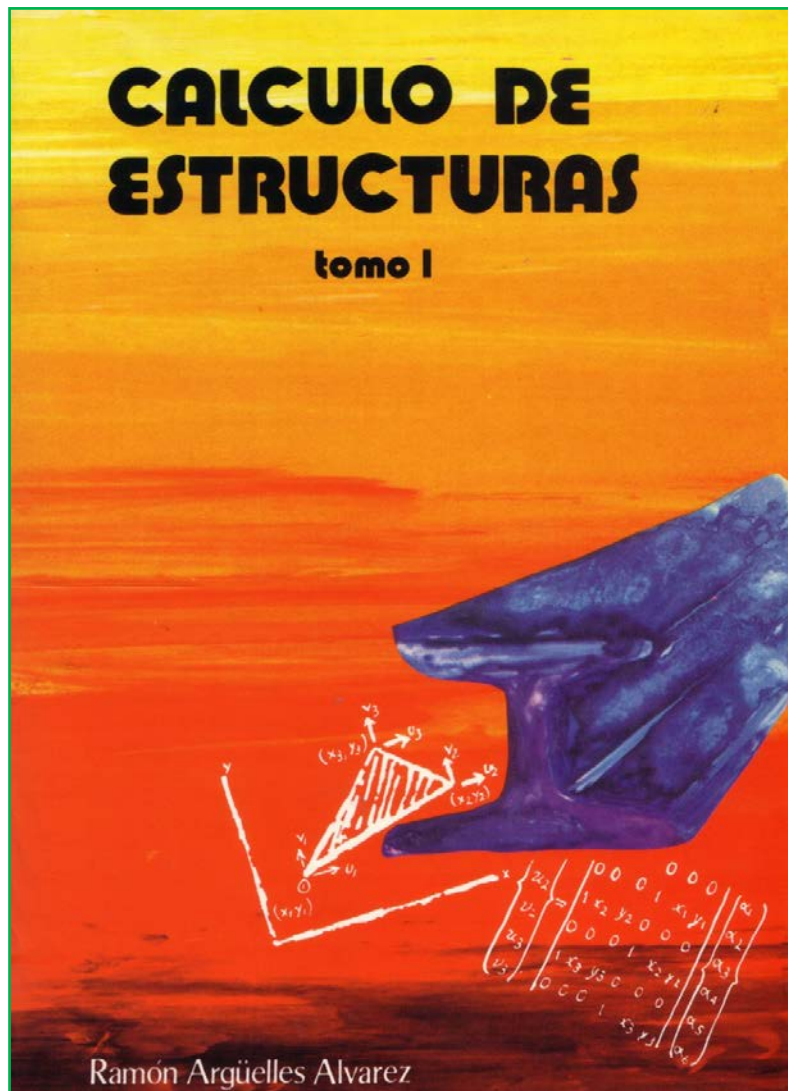


Figura 5.39 Cálculo de estructuras. Ramón Argüelles Álvarez

El mateix autor justifica la importància del càlcul matricial en el pròleg:

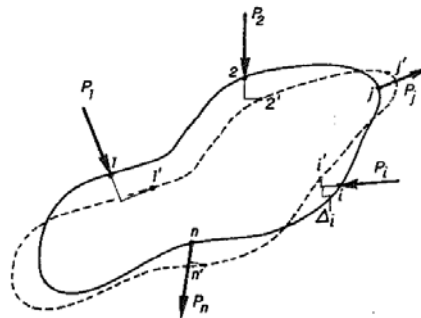
Estos últimos años, la utilización generalizada de las calculadoras electrónicas, y las facilidades existentes para acudir a Centros de Cálculo

en los que se resuelve, prácticamente, la generalidad de problemas que en la práctica se presentan, son hechos incontrovertibles que, necesariamente, **han de influir en el contenido y tratamiento de disciplinas de características técnicas y**, más aún, en el **Cálculo de Estructuras** en las que la resolución de cualquier elemento implica la ejecución de gran cantidad de operaciones numéricas.

L'objectiu inicial i alhora bàsic per l'autor és la definició de l'anomenada **matriu de rigidesa** sobre la qual definirà el mètode de càlcul matricial.

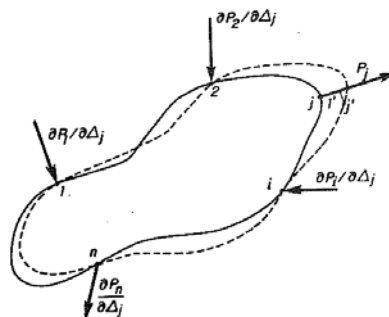
- Matriu de rigidesa

Argüelles formula el mètode partint de la deformació d'un cos elàstic sotmès a forces P_i on aplicarà, al punt i , un desplaçament Δ_i , és a dir:



82

Seguidament es dedueix, aplicant el postulats de la resistència de materials, el valor de $\frac{\partial P_i}{\partial \Delta_j}$ que representa la reacció necessària per mantenir el cos en equilibri quan hem introduït un desplaçament unitari a j ; és a dir:



Escrivint les equacions matricialment que se'n dedueixen obtenim:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \Delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \Delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \Delta_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \Delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \Delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \Delta_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \Delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \Delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \Delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \dots \\ \Delta_n \end{bmatrix}$$

Anomenant $\frac{\partial P_i}{\partial \Delta_j} = K_{ij}$, es pot escriure la relació:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \dots \\ \Delta_n \end{bmatrix}$$

Per tant;

$$P = K\Delta$$

P= Vector de forces generalitzades.

K= Matriu de rigidesa de l'estructura, formada per les matrius de rigidesa de l'estructura.

Δ = Vector desplaçament generalitzat dels nusos 1,2,...,n

Argüelles contextualitza;

Los elementos de la matriz **K_{ij}** representan las fuerzas que se generan en **i** al aplicar un desplazamiento unidad en **j** permaneciendo fijos los restantes puntos 1, 2,..., n.

La dificultat, serà per tant, l'assemblatge de la matriu de rigidesa **K**.

Per fer-ho, l'autor, proposa el sistema de bloquejar tots els nusos de l'estructura menys un. Gràcies als desplaçaments unitaris d'aquest nus es podran trobar les forces desitjades. Ho il·lustra amb els següent exemple.

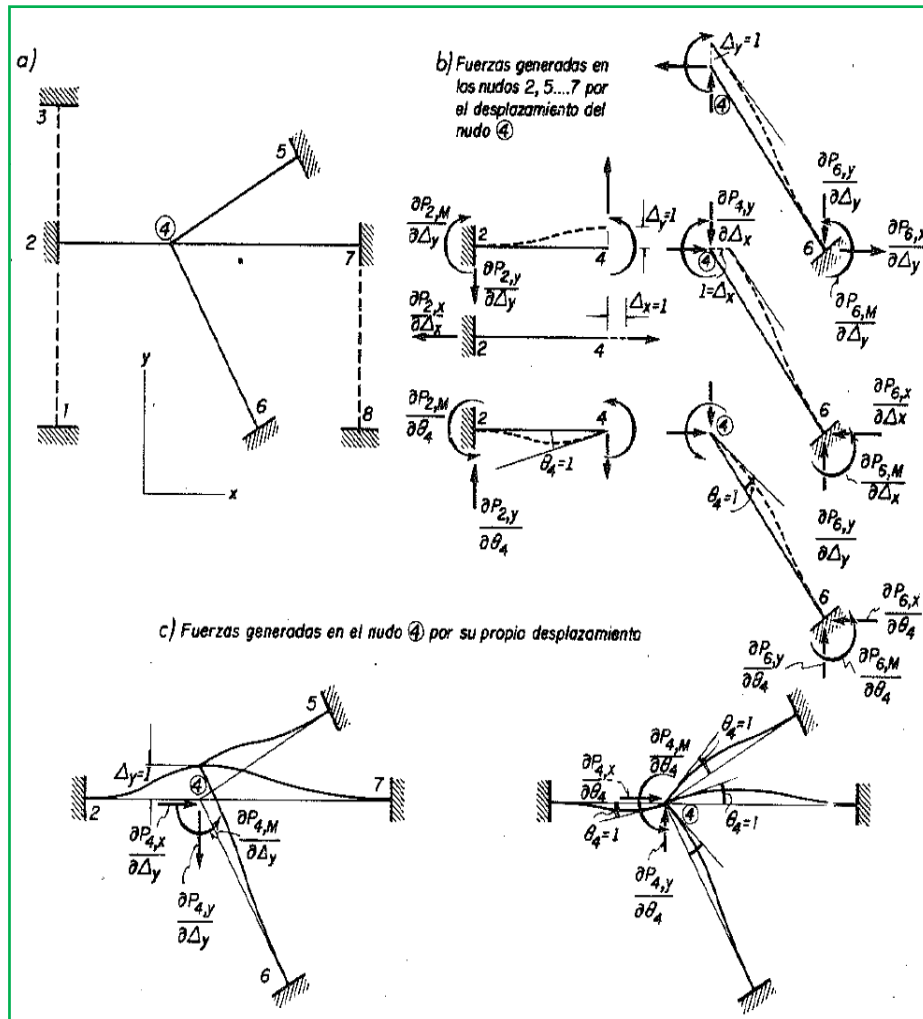


Figura 5.40 Assemblatge de la matriu de rigidesa.

Per acabar l'explicitació, l'autor mostra l'obtenció de **la matriu de rigidesa de les barres prismàtiques**. Si considerem l'element barra de la figura,

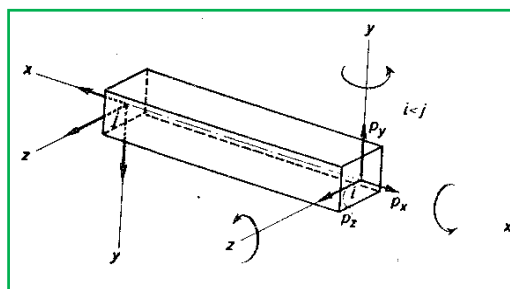
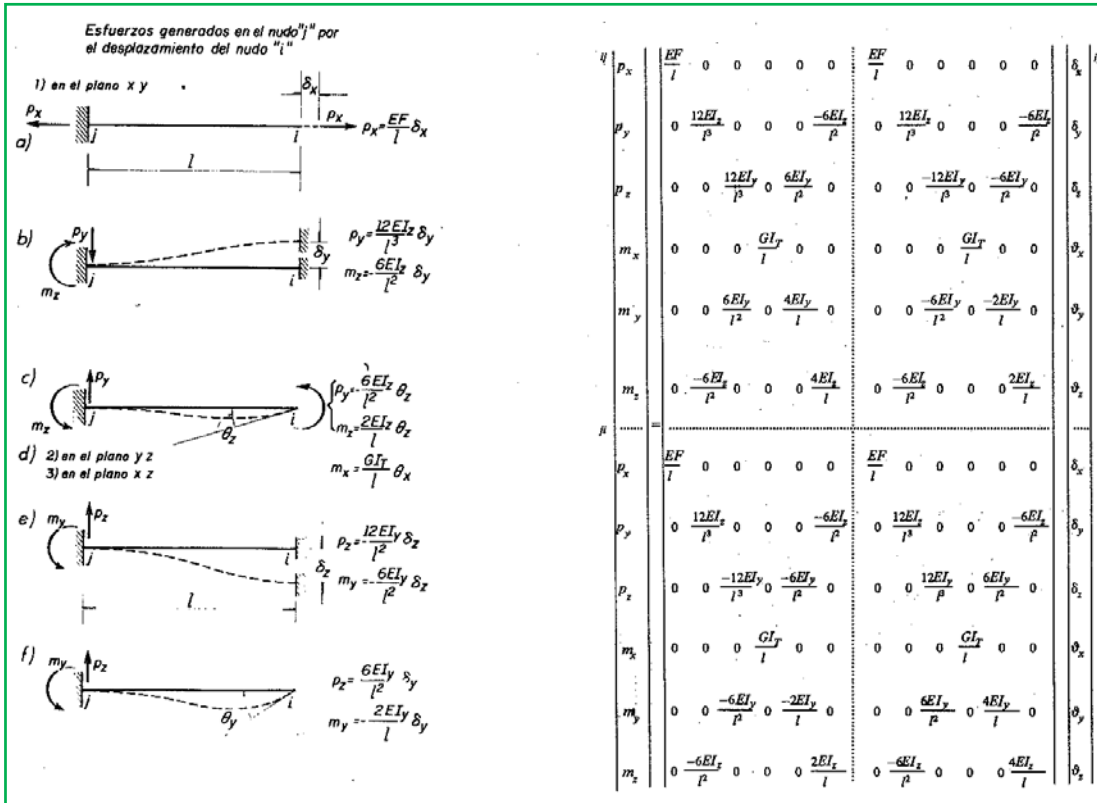


Figura 5.41 Barra prismàtica.

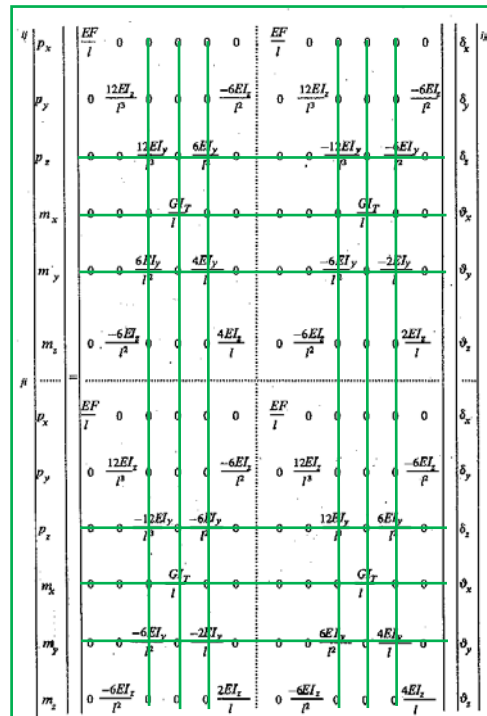
Podem obtenir les relacions de les forces a j amb els desplaçaments a i , o bé les forces desenvolupades a i degudes als desplaçaments introduïts a j recollits en la següent taula.



Un cop obtinguda, es procedirà com el cas anterior al seu assemblatge per a l'obtenció de l'equació :

$$P = K\Delta$$

Pel cas concret de pòrtics plans on $p_z=0$, $m_x =0$ i $m_y=0$, podem simplificar termes segons s'indica;



El material utilitzat a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona (E.T.S.E.I.B.) és el llibre *Teoría de estructuras*⁵², degut al catedràtic d'estructures i professor de la mateixa Dr. Josep Maria Fornons García que forma part d'un conjunt de material docent d'elaboració pròpia de l'autor per a l'ensenyament de la disciplina als alumnes de l'escola⁵³.

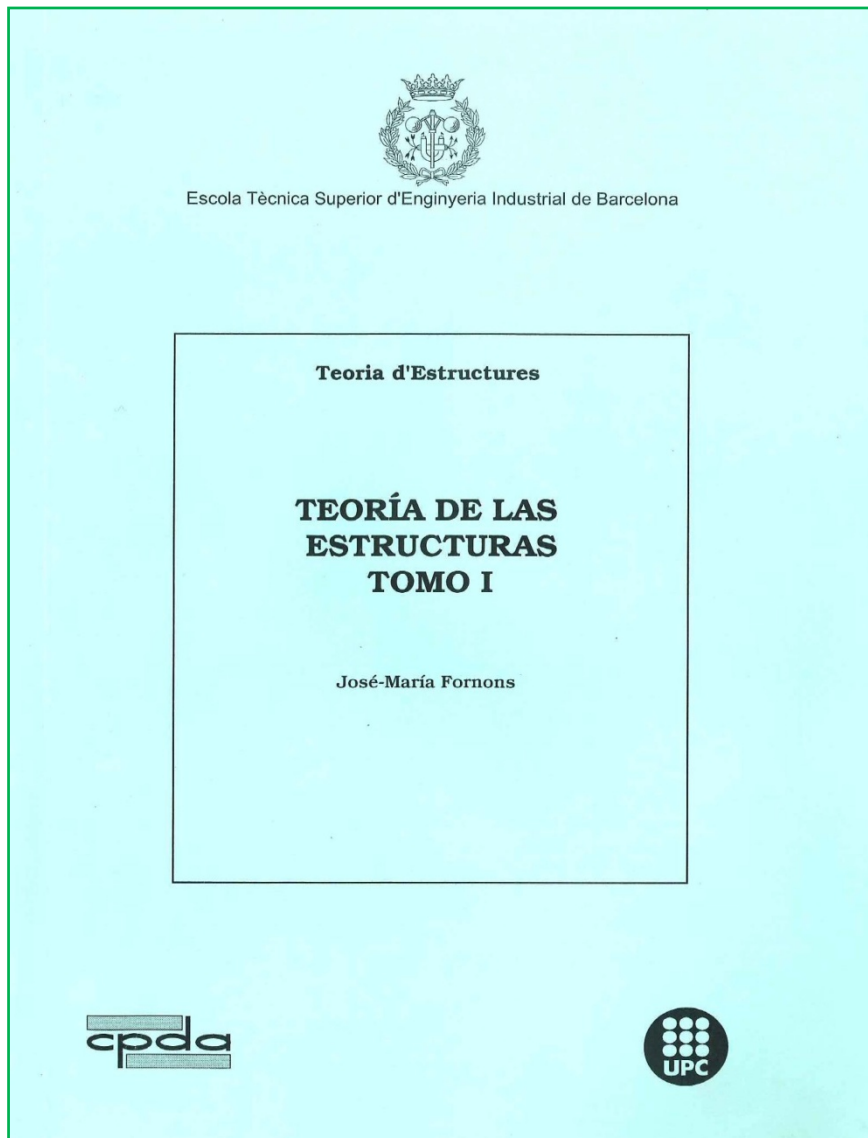


Figura 5.42 Teoría de estructuras. Josep Maria Fornons.

⁵² Fornons Josep Maria: Teoría de estructuras. CPDA. Barcelona, 1990.

⁵³ Análisis de las estructuras continuas con comportamiento no lineal. Introducción al cálculo de las estructuras de hormigón armado. Placas y láminas.

L'autor comença amb un plantejament global del problema i la seva solució.

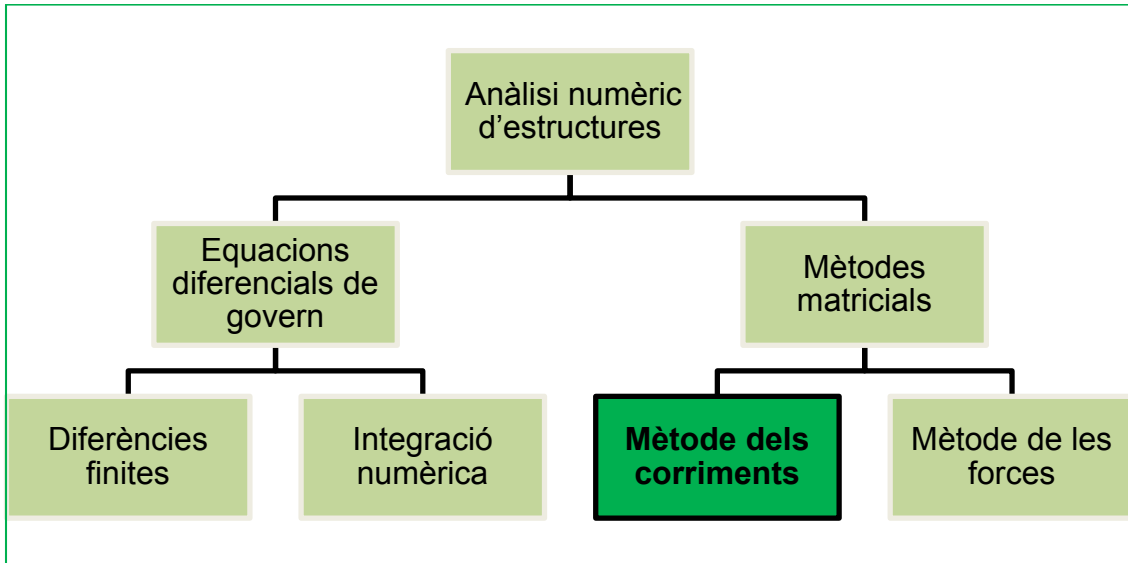


Figura 5.43 Mètodes d'anàlisi numèric.

Per a l'anàlisi d'estructures contínues amb infinits graus de llibertat s'escull el **model matemàtic d'estructura discretitzada en parts petites connectades entre sí a través de nodes**, amb la qual cosa es passa d'una estructura contínua a una altra de discreta que s'assembla el màxim possible a l'original amb les càrregues de la mateixa aplicades als nodes.

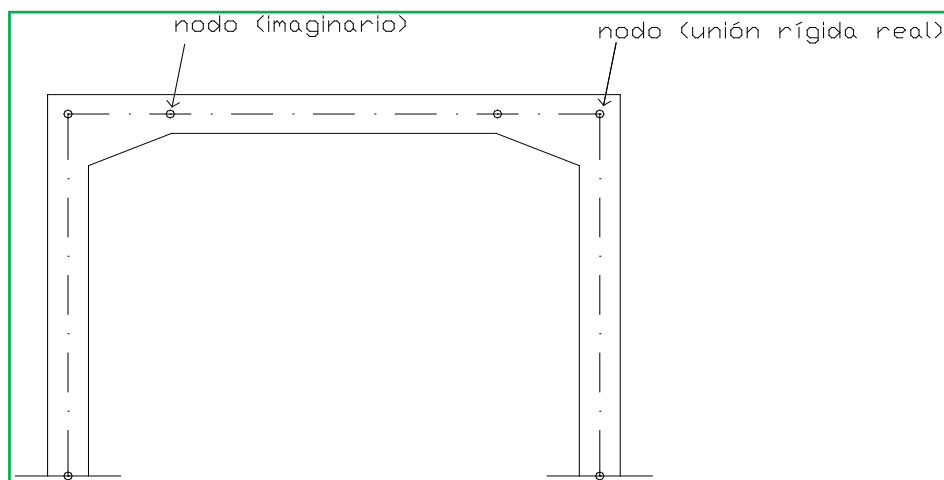


Figura 5.44 Estructura hiperestàtica discretitzada en elements barra.

Un cop discretitzada l'estructura en elements connectats entre sí als nodes, es passa a la seva anàlisi que bàsicament pot ser de dos tipus:

- **Mètode dels corriments**⁵⁴ (o de les rigideses); si les incògnites són els corriments nodals.
- Mètode de les forces (o de la flexibilitat); si les incògnites són les forces equivalents nodals.

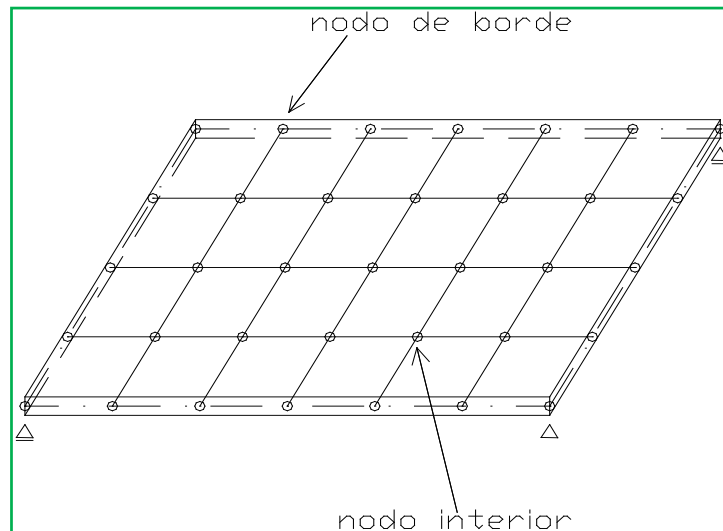


Figura 5.45 Exemple d'estructura discretitzada.

L'autor prendrà en referència pel seu estudi **el mètode dels corriments**.

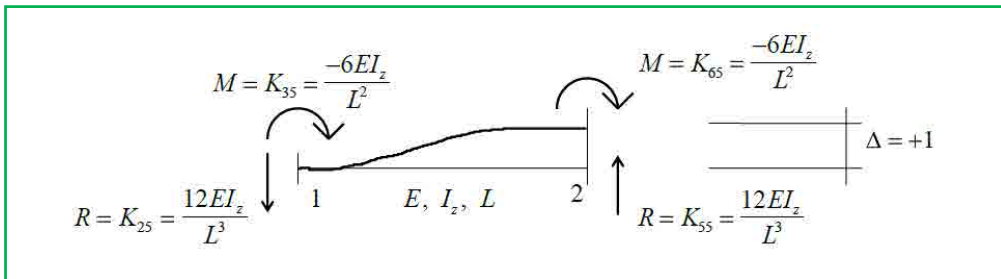
El anàlisis de comportamiento de la estructura sometida a cargas, que se suponen concentradas en los nodos, en equilibrio con las fuerzas elásticas nodales, que en ellos ejercen los elementos barra, dan lugar a un sistema de ecuaciones cuya resolución nos determinará dichos corrimientos nodales incógnitos. Dentro del mismo, el concepto de coeficiente de influencia a la rigidez del elemento barra como fuerza generalizada y la constatación de las condiciones de continuidad interelemental constituyen las bases sobre las que descansa el ensamblado de las **matrices de rigidez de los elementos barra** que dan lugar, respectivamente, a las **matrices de rigidez - global y reducida - de la estructura** ; ambos conceptos del modelo matemático son paralelos a la realidad física de ensamblado de los elementos barra que conforman la estructura⁵⁵.

⁵⁴ En la terminología actual es parla més aviat de desplaçaments.

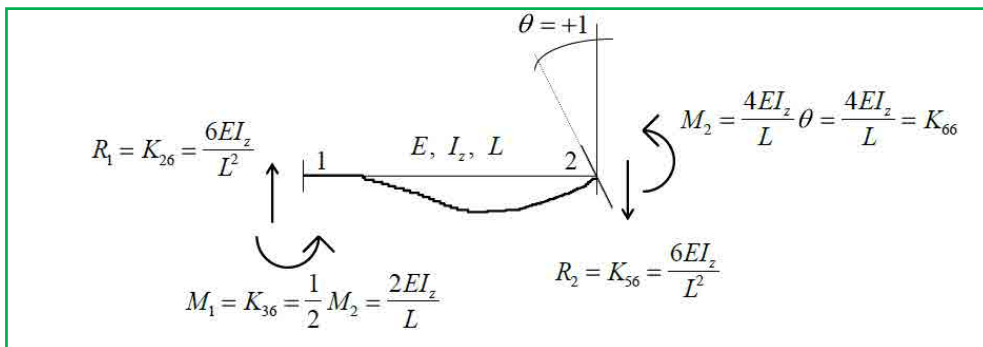
⁵⁵ Fornons Josep Maria: **Teoría de estructuras**. CPDA. Barcelona, 1990.

Es pren com a **element de càlcul bàsic la determinació de la matriu de rigidesa elemental** $[K_e]$ sobre la qual es determinarà la matriu de rigidesa global.

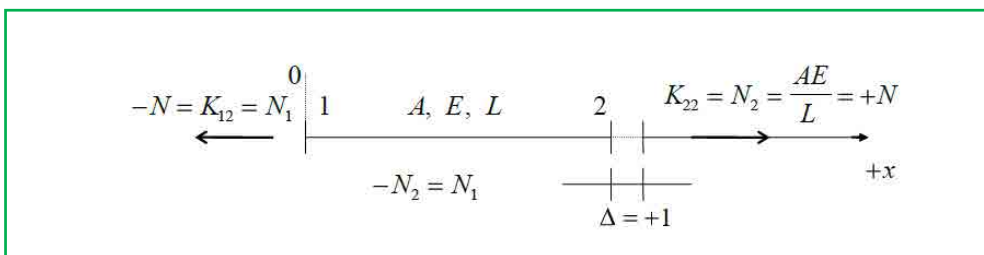
- Determinació dels coeficients d'influència a la rigidesa de l'element barra.
 - **Translació** perpendicular a la directriu d'una secció extrema sense rotació i l'altre extrem bloquejat.



- **Rotació** d'una secció extrema restant l'altre bloquejada.



- **Translació** d'una secció extrema en la direcció de la directriu restant l'altre extrem bloquejat.



És a dir;

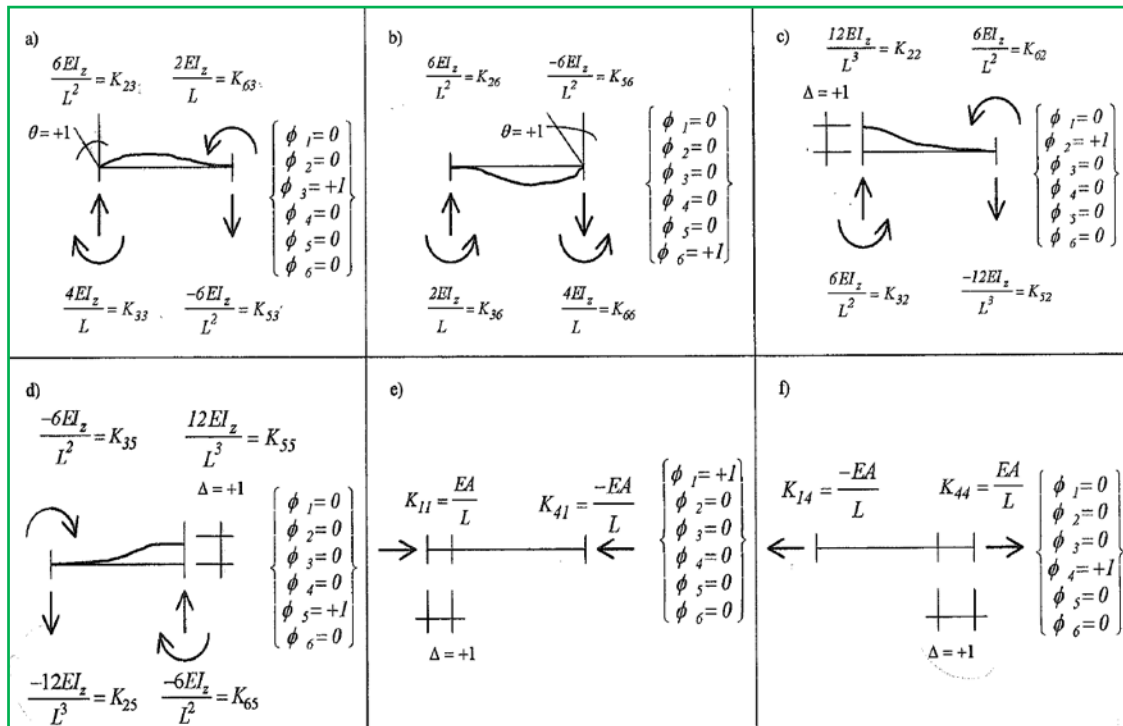


Figura 5.46 Interpretació física dels coeficients de cada una de les columnes de la matriu de rigidesa elemental.

Arribats a aquest punt l'autor ja dedueix l'expressió de la matriu de rigidesa elemental $[K_e]$.

$$[K_e] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix}$$

$$[K_e] = \frac{EI_z}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{I_z} & & & & & \\ 0 & 12 & & & & \\ 0 & 6L & 4L^2 & & & \\ -\frac{AL^2}{I_z} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{I_z} & & \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & \\ 0 & 6L & 2L^2 & 0 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Simètrica

L'expressió de les forces elàstiques generalitzades nodals $\{F_e^e\}$ corresponents a un estat de corriment nodal definit pel vector $\{\theta_e\}^T = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$, serà:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \frac{AE}{L} \cdot \phi_1 + 0 \cdot \phi_2 + 0 \cdot \phi_3 - \frac{AE}{L} \cdot \phi_4 + 0 \cdot \phi_5 + 0 \cdot \phi_6 \\ F_2 = 0 \cdot \phi_1 + \frac{12EI_z}{L^3} \cdot \phi_2 + \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_3 + 0 \cdot \phi_4 - \frac{12EI_z}{L^3} \cdot \phi_5 + \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_6 \\ F_3 = 0 \cdot \phi_1 + \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_2 + \frac{4EI_z}{L} \cdot \phi_3 + 0 \cdot \phi_4 - \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_5 + \frac{2EI_z}{L} \cdot \phi_6 \\ F_4 = -\frac{AE}{L} \cdot \phi_1 + 0 \cdot \phi_2 + 0 \cdot \phi_3 + \frac{AE}{L} \cdot \phi_4 + 0 \cdot \phi_5 + 0 \cdot \phi_6 \\ F_5 = 0 \cdot \phi_1 - \frac{12EI_z}{L^3} \cdot \phi_2 - \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_3 + 0 \cdot \phi_4 + \frac{12EI_z}{L^3} \cdot \phi_5 - \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_6 \\ F_6 = 0 \cdot \phi_1 + \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_2 + \frac{2EI_z}{L} \cdot \phi_3 + 0 \cdot \phi_4 - \frac{6EI_z}{L^2} \cdot \phi_5 + \frac{4EI_z}{L} \cdot \phi_6 \end{array} \right.$$

que, es pot escriure en forma matricial segons l'expressió :

$$\{F_e^e\} = [K_e] \cdot \{\theta_e\}$$

- Determinació de les càrregues nodals equivalents a les distribuïdes.

Les càrregues distribuïdes poden ser substituïdes per les accions contra les barres, és a dir les càrregues nodals equivalents són els moments d'encastament perfecte i les seves reaccions.

Així doncs obtenim el valor del vector de càrregues nodals com:

$$\{p'^e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R_1 \\ M_1 \\ 0 \\ R_2 \\ M_2 \end{Bmatrix}$$

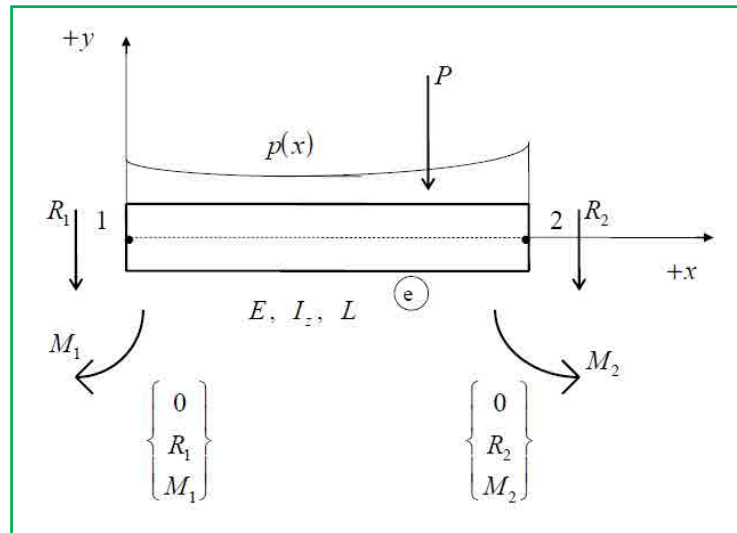


Figura 5.47 Càrregues distribuïdes i concentrades sobre la directriu

Al llibre de professor Fornons, degut al seu caràcter fonamentalment docent, s'hi troba l'esquema del desenvolupament del càlcul matricial tal com era -i és actualment- formulat a les classes. Es pot prendre com a una guia didàctica d'implementació del mateix. De fet l'esquema lliga perfectament amb el vist de l'any 1969 al qual hem fet referència al començament. De la bibliografia cercada pocs llibres de càlcul matricial indiquen una pauta per l'aplicació del mètode com la que hi trobem en aquest i que de ben segur ha estat molt ben rebuda pels seus lectors.

L'autor la transcriu com a *guia operacional*:

- 1.- Discretització de l'estructura en elements barra.
- 2.- Numeració dels nodes, dels elements barra, i dels graus de llibertat nodal especificats respecte dels eixos de coordenades generals, amb el seu corresponent conveni de signes establert.
- 3.- Establiment de les matrius de rigidesa elemental $[K'_e]$ respecte als eixos de coordenades particulars dels elements barra de l'estructura.
- 4.- Establiment de la matriu de cosinus directors $[\lambda_e]$ de cadascun dels elements barra.
- 5.- Determinació de la matriu de rigidesa elemental $[K_e]$ respecte dels eixos generals ($[K_e] = [\lambda_e]^T [K'_e] [\lambda_e]$).
- 6.- Determinació del vector de càrregues nodals equivalents $\{p'_e\}$ de cada element barra segons els seus eixos particulars i el $\{p_e\}$ respecte als generals.

7.- Ensamblat de les matrius de rigidesa elemental $[K_e]$ a fi d'obtenir la matriu de rigidesa global $[K_{EG}]$ de l'estructura.

8.- Ensamblat dels vectors càrrega elementals $\{p_e\}$, incloent-hi les càrregues concentrades als nodes, per a obtenir el vector de càrregues total de l'estructura $\{P_{EG}\}$ que inclou a les reaccions incògnites d'enllaç de l'estructura amb l'exterior i el de les càrregues exteriors conegudes $\{P_E\}$.

9.- Introducció de les condicions forçades, o d'enllaç del cos rígid: $\phi_i = 0$, $i=1,2,\dots,n$, eliminant de $[K_{EG}]$ les corresponents files i columnes, per a obtenir la matriu de rigidesa reduïda $[K_E]$ de l'estructura.

10.- Determinació de la matriu inversa de rigidesa de l'estructura: $[K_E]^{-1}$

11.- **Determinació dels corriments incògnits:** $\{\phi_E\} = - [K_E]^{-1}\{P_E\}$

12.- Determinació de les reaccions d'enllaç de l'estructura -introduint, prèviament, el vector $\{\phi_E\}$ - aïllant-les de l'equació: $\{P_{EG}\} = - [K_{EG}]\{\phi_{EG}\}$

13.- Determinació de les forces elàstiques nodals de cada element: $\{F_e^e\} = [K_e]\{\phi_e\}$, prenent els corriments elementals $\{\phi_e\}$ de vector $\{\phi_E\}$ de l'estructura.

14.- Addició de les càrregues nodals equivalents de cada element barra a les seves corresponents forces elàstiques nodals, com si de tensions imposades es tractés, per a trobar l'estat tensional: $\{\sigma_e^e\} = \{F_e^e\} + \{p_e\}$

Un cop acabada la guia del mètode, l'autor destaca;

Esta pauta operacional es general, cualquiera que sea la posición de los elementos barra dentro de la estructura y con respecto al exterior.

Con ello, el establecimiento del programa para el empleo del ordenador se **reduce a traducir cuanto antecede a su lenguaje y metodología computacional.** [...].

Figura 5.1 Portada de la victòria socialista. Font: La Vanguardia 29 d'octubre de 1982.	6
Figura 5.2 Adhesió d'Espanya a les Comunitats Europees.....	7
Figura 5.3 Unió Europea. Font: La Vanguardia 1 de novembre de 1993.	8
Figura 5.4 Barcelona és designada seu olímpica. Font: La Vanguardia 18 d'octubre de 1986.....	9
Figura 5.5 L'Anella Olímpica. Font: Arxiu fotogràfic de Barcelona.	10
Figura 5.6 Recuperació front marítim Font: Ajuntament de Barcelona.....	11
Figura 5.7 Font: La Vanguardia 19 d'abril de 1987.	13
Figura 5.8 Mètodes de Càlcul. Mètodes Numèrics.....	14
Figura 5.9 Càlculo matricial de estructures de barras. Joan Margarit, Carles Buxadé.	17
Figura 5.10 Nou enfocament del càlcul d'estructures a partir dels mètodes numèrics.....	18
Figura 5.11 Organigrama funcional para el càlculo de una estructura.	19
Figura 5.12 Teoría de las estructuras. Stephen Timoshenko. 2ª edición	22
Figura 5.13 Pòrtic continu de dos plantes	27
Figura 5.14 Obtenció dels distints valors S_{ij}	30
Figura 5.15 Ordinador IBM 1620.....	32
Figura 5.16 El Método de los Elementos Finitos. O.C. Zienkiewicz.	35
Figura 5.17 Journal of the aeronautical sciences. 1950	36
Figura 5.18 International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).	39
Figura 5.19 El Método de los Elementos Finitos en la ingeniería de estructures. J .M ^a . Fornons	40
Figura 5.20 Càlculo de estructures de acer. Vicente Cudós Samblancat..	43
Figura 5.21 Construcciones Metálicas. Fernando Rodríguez-Avial.....	45
Figura 5.22 Tipologia estructural. Zona fòrum Barcelona.....	46
Figura 5.23 Normas Tecnológicas de la Edificación.....	50
Figura 5.24 Real Decreto 1829/1995 por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 Estructuras de acero en edificación.....	56
Figura 5.25 Real Decreto 1829/1995 por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE EA-95 Estructuras de acero en edificación.....	57

Figura 5.26	Proyectos de Estructuras Metálica. Eurocódigo nº 3.....	62
Figura 5.27	Sumario. Proyectos de Estructuras Metálica. Eurocódigo nº 3.	63
Figura 5.28	Revista SERCOMETAL. Construcciones Metálicas y Calderería.	64
Figura 5.29	EUROCÓDIGO 3. Proyecto de Estructuras de Acero.	66
Figura 5.30	Prontuario de Estructuras Metálicas. 5ª edición. Ministerio de Fomento	71
Figura 5.31	Taula de conversió d'unitats (1 kg= 10 N; error 2%)	72
Figura 5.32	Classificació dels perfils en classes.	74
Figura 5.33	Control Numèric. Conceptes, característiques i conceptes bàsics.	77
Figura 5.34	Esquema de funcionament d'un torn convencional.	78
Figura 5.35	Esquema de funcionament d'un torn amb control numèric.	78
Figura 5.36	BIM; <i>Building Information Modeling</i>	79
Figura 5.37	Procés de fabricació; tall tèrmic.	79
Figura 5.38	Procés de fabricació; tall amb plasma.....	80
Figura 5.39	Càlculo de estructuras. Ramón Argüelles Álvarez	81
Figura 5.40	Assemblatge de la matriu de rigidesa.	84
Figura 5.41	Barra prismàtica.	84
Figura 5.42	Teoría de estructuras. Josep Maria Fornons.....	86
Figura 5.43	Mètodes d'anàlisi numèric.	87
Figura 5.44	Estructura hiperestàtica discretitzada en elements barra.....	87
Figura 5.45	Exemple d'estructura discretitzada.....	88
Figura 5.46	Interpretació física dels coeficients de cada una de les columnes de la matriu de rigidesa elemental.....	90
Figura 5.47	Càrregues distribuïdes i concentrades sobre la directriu.....	92