

Capítol 1

Introducció i objectius

En els darrers anys s'ha generalitzat l'ús de l'estructura metàl·lica lleugera d'acer galvanitzat conformat en fred en la construcció d'habitatges unifamiliars d'una o dues plantes. Les principals raons d'aquest augment cal buscar-les en la rebaixa dels costos que permeten, així com en la considerable reducció en els terminis de temps de construcció. A més, aporten avantatges pel que fa a la versatilitat que presenten aquests tipus d'estructura, ja que permeten construir, a partir d'unes poques tipologies d'elements estructurals, habitatges amb distribució d'espais molt diferents, donant-los l'aspecte exterior que es desitgi. Un factor clau en el seu desenrotllament és la rapidesa en la construcció. Amb la tecnologia i els sistemes estructurals disponibles a l'actualitat es pot realitzar la construcció dels habitatges en terminis inferiors a cinc mesos.



Figura 1.1. Estructura metàl·lica de l'edifici [1]



Figura 1.2. Aspecte de l'edifici un cop acabat [1]

Aquestes construccions d'última generació són fruit de l'evolució de la tradició constructiva de països centre i nord-europeus, que també es va adoptar als Estats Units on es coneixia com a *balloon frame*. El terme *frame*, o *framing*, vol dir conformar un esquelet estructural compost per elements lleugers dissenyats per donar forma i suportar l'edifici. Per definir els antecedents històrics del *Framing* hem de remontar-nos al voltant de l'any 1810, quan als Estats Units va començar la conquesta del territori, i cap a 1860, quan la migració va arribar fins a la costa de l'Oceà Pacífic. En aquells anys la població es va multiplicar per deu, i per solucionar la demanda d'habitatges es va recórrer a la utilització dels materials disponibles al lloc, sobretot la fusta, i a conceptes de practicitat, velocitat i productivitat originats en la Revolució Industrial. La combinació d'aquests conceptes i materials gestaren allò que avui coneixem com *Balloon Framing* (1830).



Figura 1.3. Construcció d'un habitatge en *Balloon Framing* l'any 1935 [2]

La utilització de l'*Steel Framing* (així és com es coneixen als Estats Units les estructures metàl·liques lleugeres) en edificis comercials i obra civil es remonta molts anys enrere. En canvi, en el camp dels habitatges només després de la segona Guerra Mundial es van començar a veure els primers exemples.

Actualment, dins de la construcció d'habitatges, l'acer es posiciona millor que el seu competidor, la fusta, degut als moviments ecologistes (l'acer és reciclable al 100%, mentre que la fusta és un material lentament renovable), les fluctuacions del seu preu, i la seva qualitat. Tots aquests factors permeten que l'acer es consolidi en el mercat d'habitatges de forma creixent.

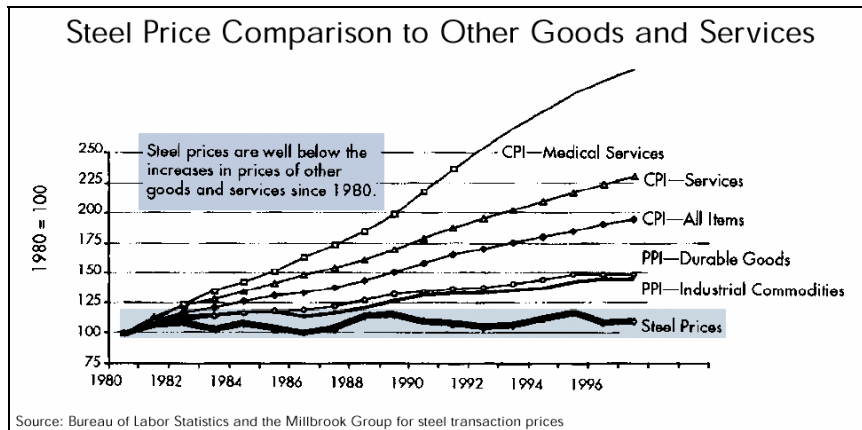


Figura 1.4. Evolució del preu de l'acer en comparació amb altres béns i serveis [3]

Al Mediterrani, la pedra, el formigó i la ceràmica són els materials característics. La tradició constructiva de països com els Estats Units, Japó, o la Xina, amb condicions climàtiques més severes que les nostres, sempre fou diferent. En aquest àmbit, ha estat orientada a materials més lleugers com la fusta, sense que això impliqui menys qualitat dels edificis. Fins i tot als països amb tradició mediterrània com la nostra, l'evolució dels sistemes i materials està dirigint-se als sistemes constructius denominats lleugers, ja que són objectivament més eficients.

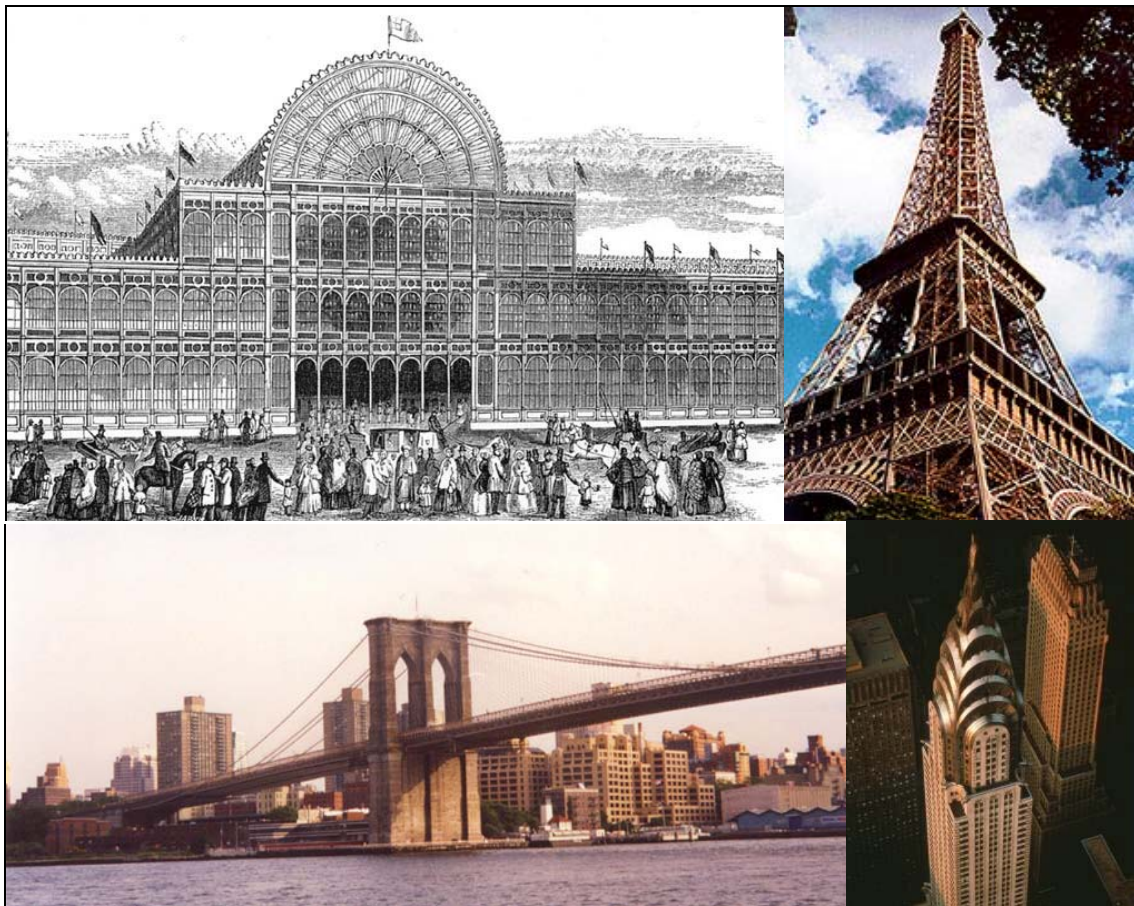


Figura 1.5. Construccions pioneres en estructura metàl·lica: Crystal Palace (Londres, 1851) [4], Torre Eiffel (París, 1889) [5], Pont de Brooklyn (Nova York, 1869) [6], Chrysler Building (Nova York, 1930) [7]

Quan s'han definit els conceptes de *Frame* i *Framing*, s'ha fet referència a les característiques estructuralment més destacables de l'*Steel Framing*, fent notar que es tracta d'un sistema lleuger i alhora molt resistent. Un altre aspecte particular de l'*Steel Framing* que el diferencia d'altres sistemes constructius tradicionals, és que està compost per una sèrie d'elements o "sub-sistemes" (estructurals, d'aïllaments, d'acabats exteriors i interiors, d'instal·lacions, etc.) que funcionen en conjunt. A tall d'exemple, podríem buscar una analogia amb el funcionament del cos humà, inferint les següents associacions:

- Els perfils d'acer que conformen l'estructura es corresponen amb els ossos del cos humà.
- Les fixacions i unions de l'estructura de l'edifici es corresponen amb les articulacions i tendons.
- Els diafragmes de rigidització en l'edifici es corresponen amb els músculs.
- Els diferents aïllaments, ventilacions i acabats de l'edifici es corresponen amb la pell i els mecanismes de respiració i transpiració.



Figura 1.6. Esquelet humà, amb els teixits musculars i la pell [8], anàlegs als perfils metàl·lics, els diafragmes i l'acabat [9].

És a dir, el conjunt de "sub-sistemes" i la manera com estan interrelacionats, és el que fa possible el correcte funcionament de l'edifici en la seva totalitat com un macrosistema. Aquesta completa integració dels diferents "sub-sistemes" és possible gràcies a la transparència del sistema estructural, que no crea barreres i permet el pas d'instal·lacions i serveis amb una llibertat quasi total. Aquest és un gran avantatge de cara al disseny dels edificis, ja que aporta una flexibilitat molt major que altres sistemes estructurals. En el cas dels habitatges, aquest és un aspecte molt notable degut a la presència d'un considerable nombre de "sub-sistemes", que a més està en augment dia a dia. Per això l'elecció i selecció de materials idonis i recursos humans, influirà en un major rendiment dels mateixos i en un correcte funcionament de l'edifici. Aquests conceptes porten a una optimització de recursos de materials, mà d'obra i temps d'execució i, com a conseqüència final, la optimització dels costos.



Figura 1.7. Instal·lació de calefacció de terra amb polietilè reticulat [9]



Figura 1.8. Instal·lació elèctrica als mòduls de paret [9]



Figura 1.9. Instal·lació elèctrica i sanitària entre les bigues de sostre [9]

Vistos els avantatges d'aquesta tecnologia, és de preveure una proliferació del seu ús, que només es veurà frenada per una manca de tradició constructiva, sobretot en la cultura mediterrània, en la qual jugaran un paper fonamental els constructors. Com es pot veure en el gràfic de la figura 1.11, un gran percentatge de consumidors confia en el seu constructor l'elecció del material més idoni per a la construcció del seu habitatge. En la següent figura (1.10) podem observar com en el mercat americà, el grau d'acceptació de l'*Steel framing* és proper al de la construcció en fusta més tradicional, malgrat la seva relativa joventut.

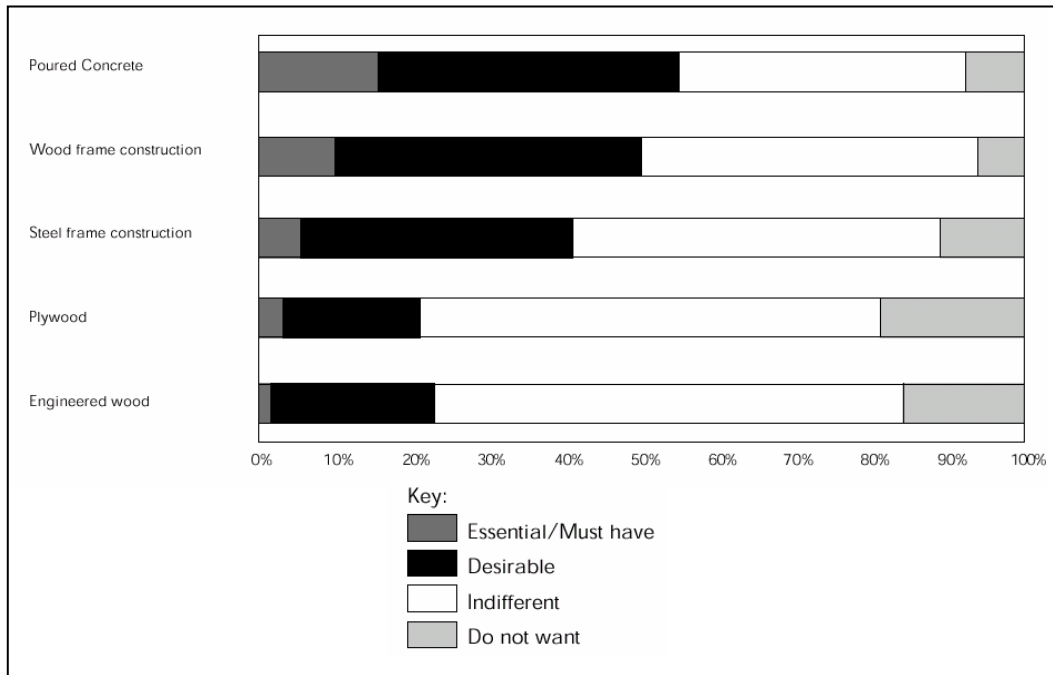


Figura 1.10. Preferències dels consumidors pel que fa als materials de construcció [10]

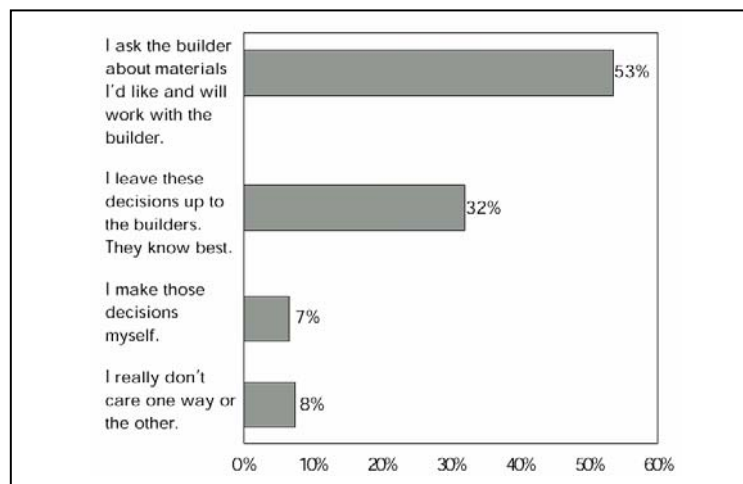


Figura 1.11. Actitud dels consumidors davant l'elecció dels materials de construcció [10]

Per a més informació sobre l'*Steel Framing* es pot consultar el material audiovisual del CD adjunt a la present tesina, que conté entrevistes amb constructors i representants d'organitzacions del sector. Tot seguit es fa un breu apunt de la informació continguda en cadascun dels vídeos:

1. Lisa Stevens, directora de Màrketng i Serveis als Professionals. "El sistema d'unions de l'acer fa que resisteixi millor davant d'huracans, tempestes de forts vents i altres fenòmens ambientals". Heather Kelley, periodista de *Builders' TV*. "Es poden construir 20 m² d'habitatge amb l'acer reciclat de sis cotxes" [11]

2. Tim Waite, president de la *Steel Framing Alliance*. “El mercat de l’*Steel Framing* s’ha triplicat en els darrers tres anys”. Jeffrey Prostor, constructor. “L’ús de l’acer és una gran forma de millorar la qualitat dels habitatges” [11]
3. Reportatge de la Nasfa¹. “L’acer pot contenir fins a un 64% de material reciclat, i tot l’acer és reciclable. De fet, l’acer és el material més reciclable del món, més que el vidre, el paper o el plàstic”[11]

Des del punt de vista estructural, l’aspecte més característic d’aquest tipus de construccions és la seva lleugeresa. Aquesta s’aconsegueix, fonamentalment, construint els elements estructurals a base de perfils de xapa de molt poc espesor (típicament inferior a 1 mm) units mitjançant cargols o soldadura. Al poc espesor de les seves seccions s’hi suma el fet que els elements estructurals solen ser extremadament esvelts (pilars de més de 2500 mm d’altura amb seccions de 100 x 100 x 1 mm) per la qual cosa els efectes de segon ordre són un aspecte crític en el seu disseny. Una qüestió fonamental i que es presenta com a novetat respecte al disseny i càlcul clàssics d’estructura metàl·lica amb perfils laminats o de xapa soldada són els fenòmens d’instabilitat global, així com també són crítics els fenòmens d’instabilitat local, que foren estudiats per A. Gómez [12].

La norma en la qual es recullen els aspectes fonamentals de disseny i càlcul d’aquest tipus d’estructures és l’*Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting* [13]. En ell s’hi proporcionen mètodes de càlcul que, tal i com es reconeix en els preàmbuls del propi eurocodi, en la majoria dels casos condueixen a solucions poc econòmiques per ser els mètodes excessivament conservadors. Això és degut fonamentalment al desconeixement que segueix existint sobre el comportament d’aquest tipus d’estructures. Pràcticament tot el coneixement es basa en assaigs de laboratori de diferents tipologies d’elements estructurals. Per aquest motiu, el camp d’aplicació de l’eurocodi es limita a tipologies sobre les quals es disposa de suficient experiència empírica. La resta de dissenys s’han de justificar amb assajos de laboratori que demostrin la seva viabilitat estructural.

El fet que els mètodes de càlcul portin a solucions poc econòmiques resulta un contrasentit amb la raó de ser de les estructures lleugeres. Com es comentava anteriorment, el baix cost de construcció d’aquest tipus d’habitatges és un dels aspectes que ha de fer decidir el client per aquesta solució i no per una altra. Per aquesta raó les empreses dedicades al disseny i construcció d’aquest tipus d’estructures solen complementar el disseny de les seves solucions amb campanyes d’assaigs en laboratori. Aquestes campanyes solen ser econòmicament costoses i no sempre condueixen a resultats satisfactoris. En aquests casos se solen plantejar solucions alternatives basades en agregar o eliminar elements del disseny original. Aquest tipus de solucions encareixen la campanya d’assaigs i no solen proporcionar grans augments de les càrregues que esgoten les seccions. És per aquesta raó que es planteja l’interès d’incloure un esglau intermig entre el disseny sobre paper de les estructures i les campanyes d’assaigs complementàries.

El mètode dels elements finits (MEF) s’ha mostrat en els darrers anys com una bona eina per simular una gran quantitat de processos i fenòmens físics. Es planteja ara

¹ La Nasfa (*North American Steel Framing Alliance*) és una organització establerta per l’*American Iron And Steel Institute* (AISI) l’any 1998 per accelerar l’ús de les estructures lleugeres d’acer.

la possibilitat de simular amb aquesta tècnica numèrica els procediments d'assaig típicament utilitzats per les tipologies estructurals més comunes. Si es pogués demostrar un bon comportament d'aquestes tècniques numèriques en el problema plantejat, es disposaria d'eines adequades per a poder optimitzar els dissenys dels elements estructurals d'una forma més econòmica i ràpida que amb els mètodes d'assaig de laboratori actuals. Aquestes tècniques no es plantegen com a substitutives dels assaigs de laboratori, sinó com a eines complementàries que permetrien assajar al laboratori els dissenys definitius sense necessitat de realitzar correccions, posteriors als assajos, en els dissenys.

Els elements estructurals lleugers solen formar-se a partir de la unió de varis perfils. Quan s'apliquen càrregues sobre aquests elements cada perfil individual es deforma en funció de les coaccions que la resta de perfils exerceixen sobre ell. Aquest aspecte és crític en la resolució numèrica, donat que s'ha de resoldre simultàniament un problema elàstic amb un problema d'autovalors generalitzats, la qual cosa aporta una dificultat afegida a la resolució.

La determinació de càrregues crítiques mitjançant el mètode d'elements finits condueix a la resolució d'un problema generalitzat de valors propis. Es pot determinar la càrrega crítica de vinclament de l'estructura modelitzada obtenint el valor propi mínim. A tal efecte existeixen una gran quantitat de tècniques numèriques àmpliament descrites en literatura. Una de les més generalitzadament utilitzades és el mètode de la iteració vectorial inversa, que permet obtenir el valor propi mínim de la matriu desitjada (ja sigui en el problema estàndar o en el problema generalitzat). Aquest mètode s'ha de combinar amb tècniques de deflació en el cas de voler obtenir els n primers valors propis.

Un cop presentat l'àmbit en el qual es localitza el treball realitzat, es presenten els objectius que pretén assolir aquesta tesina:

- Desenrotllar un algoritme que permeti simular el comportament global de l'estructura davant de tensions i deformacions, i que també permeti el càlcul dels modes propis de vinclament de l'estructura. Es mostren exemples d'aplicació en problemes senzills utilitzats durant el desenvolupament de l'algoritme.
- Analitzar l'estructura d'un habitatge a partir de l'algoritme que es crea. Es fan comprovacions a nivell tensional i de deformacions.
- Estudiar els problemes d'instabilitat de l'estructura de l'habitatge, tant a nivell global com a nivell d'algun dels elements estructurals que la conformen. S'obtenen les càrregues crítiques de l'estructura i s'estudien els mòduls i elements estructurals per analitzar-ne el comportament davant del vinclament.

L'eina de treball que s'utilitzarà és el codi d'elements finits orientat a l'objecte CASTEM [14].