



## Eficàcia estructural

"Y es que no sólo los metales y el hormigón necesitan una gran cantidad de energía por tonelada para poderlos fabricar, sino que, en las estructuras poco cargadas que son en general necesarias en los sistemas de baja energía, el peso real de los aparatos realizados con acero u hormigón es posiblemente varias veces mayor de lo que debería tener si se hubiesen hecho de materiales más ingeniosos y más civilizados"  
J.E. Gordon, *Estructuras*

"Satisfereix les necessitats de les generacions presents sense comprometre les possibilitats de les del futur per atendre les seves pròpies necessitats" informe Brundtland 1987



Proposo un tema que a mi em sembla d'innegable interès, i crec que els seus avantatges son evidents.

En el dia a dia professional, quan es fan aquest tipus de plantejaments, apareixen resistències de tot tipus, tant des dels pròpis tècnics, com d'altres que, sense ser tècnics, participen de la presa de decisions als projectes i a les obres. Aquestes resistències, suposen una inèrcia que s'oposa a propostes diferents del que estem acostumats. Per això ara us faré una mica de propaganda, a veure si trenquem el gel.

Parlaré de medi ambient, doncs el tema m'interessa, però vull deixar clar que no sóc un expert en medi ambient. Si algú de la salasap coses que poden complementar i desmentir el que jo digui, li agrairé que em talli. Bé, que em talli a mi no li agrairé. Vull dir que talli la xerrada i hi fiqui cullerada.

# Concepte d'eficàcia estructural

Bé, potser que ens deixem d'introduccions. Proposo parlar de l'eficàcia estructural. Intentem definir-ho.

Parlo d'estructures per que és al que em decico. Però ho considero prou significatiu, donat que l'estructura és aproximadament un 30% de l'obra en cost.

Eficàcia és la capacitat per aconseguir un fi.

Eficiència és la relació entre l'esforç invertit en aconseguir un fi i el grau d'acompliment d'aquest fi.

En física, eficàcia és la relació entre la energia útil i la energia total.

Si parlem d'eficàcia estructural en pes, és la relació entre el pes útil i el pes total.

Una estructura (a la construcció) és el conjunt d'elements d'un edifici que traslladen les forces que hi actuen fins al terreny (o en alguns cassos, fins a una altra estructura).

Ho lamento per als que us agradin les fórmules, però aquesta és la única que us plantejaré, i és una de ben simple. Com que una estructura es compon de matèria, l'eficàcia estructural serà la relació entre la quantitat de material emprat i la quantitat de material efectiu. Expressat en pes, tindrem:

Eficàcia estructural,  $E_e = \text{Pes total} / \text{pes útil}$  (el terme està registrat)

De manera simplificada, si estudiem una estructura concreta, el pes total seria el pes de la pròpia estructura més la càrrega que pot suportar. El pes útil seria la càrrega que pot suportar.

Cal fer una matització tècnica: donat que estem simplificant, hem fet dues simplificacions:

1: tant en el pes total com en el pes útil, considerem el que teòricament es quantifica en els projectes.

2: de la mateixa manera, quan parlem del que una estructura pot suportar, considerem el que teòricament s'ha valorat al dissenyar-la.

Per tant, i aquesta és la primera obvietat, seran més eficaces les estructures que amb menor pes suportin una càrrega determinada.

Fins aquí, alguna pregunta?

Jo sí que en tinc una: què hi ha de tots els altres aspectes susceptibles d'optimitzar en el disseny d'una estructura: despesa energètica, renovabilitat de recursos naturals, reciclabilitat...?

Bona pregunta. En efecte: es pot definir l'eficàcia en despesa energètica, eficàcia en l'ús de recursos naturals, eficàcia en la reciclabilitat... però no tenia prou diners per registrar tants conceptes, així que ho deixem per un altre que s'anirà, encara que després potser em refereixi a algun d'aquests aspectes.

Molt bé, seguim. A petició de l'organització posaré un exemple per il·lustrar el concepte d'eficàcia estructural, ja que després em dispo a abordar una part dura, important, però molt dura de l'explicació.

En concret, l'exemple il·lustra el que es coneix com a llei de quadrat-cub, enunciada per Galileu 370 anys, i que emmarca perfectament el concepte. El que diu la llei és una altra obvietat: que les tensions en un element que té igual proporció i tamany diferent no es mantenen constants. O dit d'una altra manera, que quan els objectes creixen proporcionalment, la seva capacitat per resistir forces disminueix.

Pensem en una poma penjant de la branca d'un arbre. La poma medeix 10cm de diàmetre, és esfèrica, i té densitat 1. El branquilló (vástago) del que penja fa 3mm de diàmetre.

Per tant, el pes de la poma serà:  $P = 1 \times \frac{4}{3} \pi r^3 = 0,52 \text{ kg}$

La secció que la suporta fa:  $A = \pi r^2 = 7,1 \text{ cm}^2$

Per tant, la tensió (tracció) serà de:  $\sigma = 0,073 \text{ kg/cm}^2$

Si la poma dobla el seu tamany, mantenint proporcions i la densitat, passarem a tenir una esfera de 20cm de diàmetre i un branquilló de 6mm:

Per tant, el pes de la poma serà:  $P = 1 \times \frac{4}{3} \pi r^3 = 4,2 \text{ kg}$

La secció que la suporta fa:  $A = \pi r^2 = 28,3 \text{ cm}^2$

Per tant, la tensió (tracció) serà de:  $\sigma = 0,15 \text{ kg/cm}^2$

Per tant, si la resistència de la branca posem per cas, en la poma de 10cm era al límit, en la poma de 20cm, necessitarà un branquilló de major tamany en proporció:

Des d'aquest punt de vista, es poden interpretar les figures de Botero, que han crescut tant, que les seves proporcions. Reculten molt il·lustratives.



Una altra comprovació interessant que es pot fer és l'alçada màxima que pot tenir una estructura.

El gratacels més alt del món s'ha construït recentment a Dubai. Fa més de 800 metres d'alçada. No sé quin formigó s'ha utilitzat en la seva estructura, ni el tipus d'estructura ni la separació entre suports. Els formigons de major resistència a compressió que s'utilitzen avui dia a la pràctica són de 100MPa (4 vegades més resistent que els que usem en les obres en les que jo participo). Independentment de l'estructura, l'alçada màxima que pot construir-se amb aquest pilar sense que es trenqui pel seu propi pes és  $\sigma / \text{densitat} = 1000 / 2500$  de 4000 metres.



Fins aquí el concepte d'eficàcia estructural. Alguns exemples.

Són eficaços els perfils buits per treballar a flexió, pandeig: bambú, tubs d'acer, ossos. No són eficaços els pilars cruciformes del pavelló de Montjuïc de Mies.



Segons amb quins materials, són altament eficaços arcs, bòvedes, cúpules, i formes amb corbatura en general.

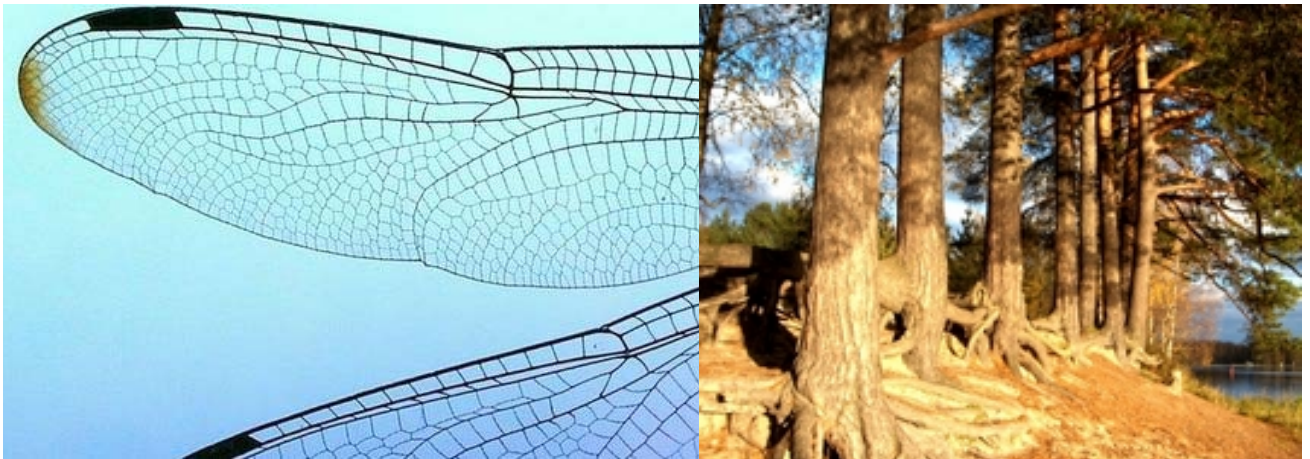




Els forjats plans com a tipus no son especialment eficaços.



En general, les estructures que construeix la natura son molt eficaçes. La biomimètica és una corrent de coneixement que estudia com resol problemes de tota mena la natura, per tal de trobar solucions per mimetisme.



## Tipologies d'estructures i les seves repercussions

Entramat metàlic.  
Lleuger.  
Bona resistència mecànica.  
Gran despesa energètica en la seva producció.  
Reciclable



Sostres amb ceràmica.  
Sistemes molt estesos.  
Lleuger.  
Producció artesanal.  
Escassa reciclabilitat.





Durant els darrers anys hem estat dissenyant estructures on predominava aquest el formigó. És però, un material molt pesat, difícil de reciclar, i a més té un gran inconvenient: la majoria dels materials dels quals procedeix son recursos no renovables. El formigó és a les estructures el que el petroli és a les fonts d'energia.

Com a nota més o menys anecdòtica però respesentativa, la web dels cimentaires porta dos anys lamentant-se la la quantitat de ciment de menys que es ven.

Formigó armat / lloses / greques

El formigó prové de ercursos no renovables

Formigó postessat



Fusta: bigues / panells contralaminats / taulons aglomerats / ballon frame. Amb una gestió ben pensada, tots aquests materials provenen de recursos renovables. La fusta és a les estructures el que el sol és a les fonts d'energia.



Materials compostos

Indicadors energètics de diferents materials

Energia aproximada necessaria per la producció de diferents materials bàsics en construcció		
Material	Energia fabricació (Jx10 <sup>9</sup> /Ton)	Equivalència en petroli (Ton)
Acer dolç	4	40
Alumini	250	6
Vidre	24	0,6
Ceràmica	6	0,15
Formigó	4	0,1
Composites	4000	100
Fusta	1	0,025
Polietilè	45	1,1

## Petit estudi comparatiu

Es consideren 6 tipus de forjats, simplificant el fet que els suports i fonaments són equivalents per a tots ells, no tenint en compte amb aquest criteri el fet que penalitza les solucions més pesades tant en quantitat de suports com de fonaments.

El concepte, es pot definir des de molts punts de vista.

- $E_b$  Eficiència estructural bruta en pes: relació entre la sobrecàrrega i el pes de tots els elements suportats
- $E_c$  Eficiència constructiva en pes: relació entre la càrrega útil suportada i el pes de tots els elements constructius
- $E_u$  Eficiència estructural última en pes: eficiència estructural per la càrrega màxima per un determinat ELU
- $E_s$  Eficiència estructural de servei en pes: eficiència estructural per la càrrega màxima per un determinat ELS

I a més de la lleugeresa, podem afegir eficàcia en paràmetres com:

Energia per a l'extracció  
Emissions de CO<sub>2</sub>  
Transport,  
Renovabilitat dels recursos  
Reciclabilitat...

Estudiem els 6 tipus de forjats per a tots els cassos, un habitatge amb llum de 5 metres en un tram doblement recolzat.

Càrregues mortes: 2 KN/m<sup>2</sup>  
Sobrecàrrega: 2 KN/m<sup>2</sup>

	Llosa massisa 20cm cantell	Reticular 25cm cantell	Bigueta 27cm cantell	Llosa postessada alleugerida 15cm cantell	Contralaminat 20cm cantell	Entramat metallic
Pes propi	5,0	4,0	2,5	2,6	0,8	1,0
Càrrega càlcul	9,0	8,0	6,5	6,6	4,8	5,0
$E_c$	0,22	0,25	0,31	0,30	0,42	0,4

Com que les necessitats habituals, o segons l'expressió de Gordon, en sistemes de baixa energia, tant en ELU com en ELS queden en rangs de càrrega molt inferiors als màxims considerats, l'ampli marge que tenen les estructures molt resistents és en general poc útil. És com si la poma d'abans, que pesava 500 grams, tingués la branca d'acer. Per tant, una valoració comparativa objectiva dels diferents tipus de forjats analitzats revela que hi ha gran diferència segons els tipus de forjat que us'utilitzis. El mateix es pot traslladar a la resta d'elements i paràmetres constructius.

L'eficàcia òptima es troba en la confluència entre les propietats del material, la forma i el tamany de l'estructura (o de l'objecte).

## Eficàcia constructiva

Des del punt de vista de processos, eficiència és la relació entre l'energia útil i l'energia total. L'energia útil en el cas de processos constructius és un paràmetre que no té una incidència directa en el producte obtingut, doncs l'energia s'utilitza per obtenir, transformar, transportar, col·locar els productes per construir quelcom que no té un ús del qual s'espera un rendiment energètic.

Des del punt de vista de materials, eficiència és la relació entre el pes útil i el pes total. Podem establir que el pes útil és aquell que serveix per assolir uns determinats requeriments, d'aïllament, resistents, de creació d'espai, els quals, per les seves naturaleses tant diverses i complexes, sembla difícil de posar en comú en una valoració global.

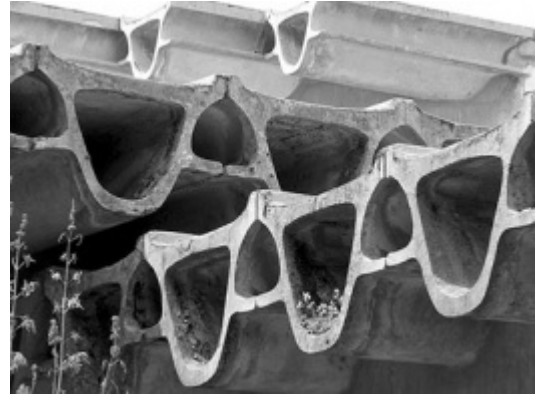
Però l'energia emprada en el procés d'obtenció d'un producte també té una incidència directa en l'impacte mediambiental del resultat. Per tant, valorar l'eficiència en pes dels materials de construcció sense incloure l'energia sembla erroni.



## Conculsions per al debat

Hi ha qui vaticina la mort del formigó. Al menys la mort parcial, l'abandonament de l'ús massiu del formigó armat tal com he fet els darrers anys (potser els darrers 50 anys). Pot seguir existent en fonaments, on les seves prestacions en durabilitat son difícils de supoerar per molts materials altenatius. També en postessats amb alleugeriment, una línia de desenvolupament de materials formàcis, on el formigó és líder indiscutible, segons la qual la determinació de la forma no sigui únicament dimensional o geomètrica, sinó que sigui tensional. Materials compostos on l'especialització resistent dels seus components vingui determinada per posicions, direccions, tipus d'esforços, plastificacions, efectes reològics. En pocs anys veurem formigons amb les armadures seran substituïdes per fibres, però no només substituïdes, sino que el nou compost tindrà unes possibilitats molt grans, que, entre moltews altres avantatges, permetran alleugerir significativament les estructures.

En aquesta línia hi poden entrar també els prefabricats de formigó o derivats, en versió de prefabricats a mida evolucionats amb les tècniques actuaes la direcció de l'obra de Fisac



I aquesta línia convergeix amb tot un camp de possibilitats en la prefabricació lleugera en sec. Segons la expressió de Sandra Bestraten: prefabricació tova. En forma de panells de materials naturals, reciclats, compostos, sempre en composicions optimitzades i per tant lleugeres, és a dir: amb un ratio d'eficàcia important.