

## **BASES DE CàLCUL ESTRUCTURAL AMB FUSTA**

### **1.1 ACCIONS EN L'EDIFICACIÓ**

Les accions que s'aplicaran sobre l'edificació són independents del material de l'estructura, així que aquest capítol es comú en tots els càlculs estructurals. [15]

#### **ACCIONS PERMANENTS. PES PROPI (G)**

Per tal de poder realitzar un càlcul adequat, s'ha de tenir en compte el propi pes del element que es dimensiona, així com la seva direcció i sentit respecte l'element.

Al realitzar el dimensionat no coneixem la dimensió de l'element i per tant no coneixem el seu pes propi, per aquest motiu es realitza una estimació del valor, per posteriorment una vegada es disposa d'una secció i d'un pes propi real, efectuar la comprovació de l'element.

Per definir la densitat de la fusta de l'element, s'haurà de tenir en compte els valors de les densitats segons la taula E.3 de l'annex E del codi tècnic de l'edificació SE-AE [15] o bé conèixer la densitat real de l'element estudiat mitjançant algun tipus d'assaig o definit per el fabricant.

#### **ACCIONS PERMANENTS. CÀRREGUES MORTES**

Es consideren càrregues mortes aquelles que estan sol·licitant a l'estructura de forma permanent sense aportar una resistència estructural, típicament els pesos propis dels elements de tancament.

Es poden realitzar els càlculs coneixent exactament els materials de tancament i considerant els pesos propis concrets segons el fabricant de cada material, o bé realitzant una estimació segons els valors definits en la taula C.2 de l'annex C del SE-AE del CTE [15]. Posteriorment s'hauran de validar aquest valors estimats.

#### **ACCIONS VARIABLES. SOBRECÀRREGA D'ÚS**

S'entén per sobrecàrrega d'ús tota càrrega que pot gravitar sobre l'edificació per raons d'ús, referent a persones, mobiliari, etc. Generalment es considera una càrrega uniformement repartida (kN/m<sup>2</sup>) o per comprovacions locals una càrrega puntual concentrada (kN)

Per el càlcul de les accions variables referent a la sobrecàrrega d'ús es consideren els valor segons taula 3.1 "Valores característicos de las sobrecargas de uso" del DB SE-AE del codi tècnic de l'edificació [15], tenint en compte l'ús concret de l'estructura a dimensionar.

#### ACCIONS VARIABLES. SOBRECÀRREGA DE VENT

La sobrecàrrega de vent ( $q_e$ ), ve definida segons el CTE en l'apartat 3.3 del DB SE-AE [15], com una acció perpendicular a la superfície de cada punt exposat mitjançant la següent expressió:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

- $q_b$  és la pressió dinàmica del vent, definida segons l'annex D mitjançant l'expressió  $q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2$ , segons la zona on es troba la localitat en el mapa zonal.
- $C_e$  és el coeficient d'exposició, definit segons el grau d'aspresa del entorn i de l'alçada del punt considerat. Es defineix en l'apartat 3.3.3 Coeficient d'exposició del DB SE-AE del CTE [15].
- $C_p$  és el coeficient eòlic o de pressió, definit segons la forma i l'orientació de la superfície respecte al vent. Es defineix en l'annex D.3 del DB SE-AE del CTE [15].

#### ACCIONS VARIABLES. ACCIONS TÈRMiques

Les accions tèrmiques es defineixen en l'apartat 3.4 del DB SE-AE del codi tècnic de l'edificació [15].

En el càlcul d'estructures de fusta, no es consideren ja que no tenen una rellevància important, degut a les insignificants contraccions i dilatacions provocades per els canvis de temperatura ambiental que pateix la fusta.

#### ACCIONS VARIABLES. SOBRECÀRREGA DE NEU

La sobrecàrrega de neu ( $q_n$ ), segons l'apartat 3.5 del DB SE-AE del codi tècnic de l'edificació, [15] es defineix mitjançant la fórmula:

$$q_n = \mu \cdot S_k$$

- $\mu$  és el coeficient de forma de la coberta.
- $S_k$  és el valor característic de la càrrega de neu definit per l'annex E [15].

#### ACCIONS ACCIDENTALS. SISMES

No es tenen en consideració per efectuar el càlcul estructural degut als valors relativament petits d'activitat sísmica del territori espanyol.

#### ACCIONS ACCIDENTALS. INCENDI

Les accions degudes a l'agressió tèrmica en cas d'incendi es defineixen segons el DB-SI del codi tècnic de l'edificació. [16]

#### ACCIONS ACCIDENTALS. IMPACTE

Son accions sobre l'edificació causades per el impacte d'una massa.

## 1.2 FACTORS DE CORRECCIÓ I COEFICIENTS DE SEGURETAT

Principalment hi ha sis factors o coeficients definits en el CTE, que s'apliquen a les propietats resistents de la fusta, són el coeficient de seguretat ( $\gamma_M$ ), el factor de modificació ( $k_{mod}$ ), el factor d'alçada ( $k_h$ ), el factor de volum ( $k_{vol}$ ), el factor de longitud ( $k_L$ ) i el factor de càrrega compartida ( $k_{sys}$ ). [17]

Primerament, com tot material estructural, per definir les propietats de càlcul o resistències de càlcul, es divideix la seva capacitat de càrrega característica o valors característics de les propietats del material per un coeficient parcial de seguretat, que limita els valors de càlcul respecte els característics. Aquest coeficient és inversament proporcional a la certesa o confiança que transmet el material, segons el tipus de fusta, i en la situació de càlcul que es defineix.

Així que per situacions extraordinàries el  $\gamma_M$  és del valor de la unitat, mentre que per situacions persistents i transitòries el coeficient de seguretat depèn del tipus de fusta sent 1,30 per la fusta massissa, per taulers de fibres i taulers de partícules, i en les unions sent 1,25 per la fusta laminada encolada i plaques clau, i sent 1,20 per fusta microlaminada, taulers contraxapats i taulers d'encenalls orientades. Aquests valors s'obtenen de la taula 2.3 del DB-SE-M del CTE [17].

L'altre factor de correcció en el càlcul estructural amb fusta és el factor de modificació,  $k_{mod}$ , que és directament proporcional als valors i resistències característiques. Aquest valor es troba definit per la taula 2.4 del DB-SE-M [17], depenent de tres condicionant, la classe de servei que es troba l'element, el material o tipus de fusta, i de duració de les càrregues aplicades, sempre considerant l'acció de més curta duració.

Per situacions d'incendi, aquest coeficient pren el valor de la unitat, tal com es defineix en el DB-Si-Annex E.2.1.c) del CTE [16].

Respecte el factor d'alçada,  $k_h$ , aquest es defineix mitjançant les següents fórmules segons el tipus de fusta i depenent del cantell a flexió o de la major dimensió de la secció a tracció "h", sempre aplicant-se en seccions rectangulars.

$k_h = (150 / h)^{0,2} \leq 1,3$  per fusta massissa i  $h < 150$ mm. Afectant solament als valors característics  $f_{m,k}$  i  $f_{t,0,k}$

$k_h = (600 / h)^{0,1} \leq 1,1$  per fusta laminada encolada i  $h < 600$ mm. Afectant solament als valors característics  $f_{m,g,k}$  i  $f_{t,0,g,k}$

$k_h = (300 / h)^s \leq 1,2$  per fusta microlaminada i  $h \neq 300$ mm. On "s" és un valor definit per el fabricant d'acord amb la normativa UNE EN 14374. Afectant solament al valor característic  $f_{m,k}$ .

El quart factor de correcció de la resistència és el factor de volum,  $k_{vol}$ , que s'aplica en la fusta laminada encolada, afectant solament al valor característic  $f_{m,k}$ , i sempre hi quant el volum de la zona de comprovació sigui superior a 0,01 m<sup>3</sup>, amb la fórmula següent:

$$K_{vol} = (0,01 / V)^{0,2}$$

Aquests dos factors de correcció,  $k_h$  i  $k_{vol}$ , es poden veure definits també segons la taula 2.1 del DB-SE-M del CTE [17].

El cinquè factor de correcció és el factor de longitud,  $k_L$ , que s'aplica en la fusta microlaminada sotmès a tracció paral·lela, afectant solament al valor característic  $f_{t,0,k}$ , sempre i quant la longitud difereixi de 3.000mm, amb la següent fórmula on "L" és la longitud de l'element i "S" un valor definit per el fabricant:

$$K_L = (3000 / L)^{s/2} \leq 1,1$$

Finalment, el sisè factor de correcció de resistència, afecta a elements estructurals a flexió que transversalment estan connectats amb un sistema continu de distribució, podent multiplicar les seves propietats mecàniques per el factor de càrrega compartida,  $K_{sys}$ . Sempre que dit sistema de distribució transmeti un element a un altre, com és el cas de la fusta emmetxada, aquest valor es pot considerar 1,1, mentre que en altres casos com pisos de lloses massisses de fusta laminada aquest valor el defineix la taula 2.1 del DB-SE-M del CTE [17].

Així doncs, per aconseguir els valors de càlcul de les diferents propietats del material i de les unions, s'aplica la següent fórmula:

$$X_d = k_{mod} \cdot \frac{X_k}{\gamma_M} \cdot K_h \cdot K_{vol} \cdot K_L \cdot K_{sys}$$

$X_d$  valor de càlcul de la propietat del material

$X_k$  valor característic de la propietat del material

Òbviament hi han factors que només s'aplicaran en algunes propietats concretes del material, tal i com es defineix en l'explicació de cada un dels factors, prenent el valor de la unitat en les altres propietats calculades.

### 1.3 ESTATS LÍMITS ÚLTIMS (ELU)

Els estats límits últims són aquelles situacions estructurals que de ser superades són un perill per l'estabilitat i la resistència de l'estructura, podent provocar el col·lapse estructural total o parcial de l'edifici i per tant danys a les persones. Hi ha dos estats

límits últims que s'han de considerar, els deguts a la pèrdua de l'estabilitat i els corresponents al trencament per resistència dels elements estructurals o unions entre aquests. [18] [17]

Respecte a l'estabilitat del conjunt de l'edifici o del conjunt d'elements estructurals, s'ha de verificar la següent condició, en totes les situacions de dimensionat pertinents.

$$E_{d,dst} \leq E_{d,std}$$

$E_{d,dst}$  Valor de càlcul dels efectes de les accions desestabilitzadores.

$E_{d,std}$  Valor de càlcul dels efectes de les accions estabilitzadores.

Mentre que respecte a la resistència d'una estructura portant, un conjunt estructural, una secció o un punt d'unió d'aquests, s'ha de verificar, en totes les situacions de dimensionat pertinents i en totes les propietats, la següent condició.

$$E_d \leq R_d$$

$E_d$  Valor de càlcul dels efectes de les accions

$R_d$  Valor de càlcul de la resistència dels materials.

Per comprovar el compliment d'aquestes dues condicions, resistència i estabilitat, s'han d'estudiar les diferents situacions de dimensionat que es defineixen en el CTE. Aquestes situacions respecte els estats límits últims són, la situació persistent o transitòria, la situació extraordinària i la situació extraordinària de sisme. Per definir aquestes situacions és necessari la consulta dels coeficients parcials de seguretat segons la naturalesa de l'acció ( $\gamma$ ) i els coeficients de simultaneïtat ( $\Psi_0, \Psi_1$  i  $\Psi_2$ ), definits en les taules 4.1 i 4.2 del CTE DB SE.

La situació persistent o transitòria es determina amb l'expressió que es mostra a continuació, segons la següent combinació d'accions.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

$G_k$  Valor característic de l'acció permanent

$P$  Valor característic de l'acció de pretensat

$Q_k$  Valor característic de l'acció variable

$\gamma$  Coeficients parcials de seguretat segons la naturalesa de l'acció

$\Psi$  Coeficient de simultaneïtat

La situació extraordinària es determina segons la combinació de les accions en la següent expressió.

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_p \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

$A_d$  Valor de càlcul d'una acció accidental qualsevol.

Finalment, la situació extraordinària de sisme es determina segons la següent expressió.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Finalment, per realitzar la comprovació d'un element dins d'una estructura, s'ha de complir aquests requisits segons els diferents esforços que l'afecten. Per definir les formulacions concretes a complir segons els esforços, s'ha de consultar el CTE DB SE-M apartat 6 [17], on s'exposen en diferents punts les condicions a verificar segons si l'esforç és de compressió, tracció, flexió, etc.

En aquest apartat no es creu necessari exposar cada condició concreta, ja que consisteix purament en el compliment del CTE [17]. Més endavant, en l'apartat 5.2.4. en la comprovació del elements de fusta del cas pràctic, es pot consultar l'aplicació d'aquestes condicions.

#### 1.4 ESTATS LÍMITS DE SERVEI (ELS)

Els estats límits de servei són aquelles situacions estructurals que de ser superades afecten el funcionament normal de l'estructura, poden tenir caràcter reversible o irreversible, com per exemple són les deformacions per fletxa d'un element, els assentaments, els desploms i les vibracions [18].

Respecte a les deformacions d'un element o d'un conjunt d'elements estructurals, aquests poden afectar la integritat dels elements constructius, el confort del usuari i l'aparença en obra, així que segons aquest tres conceptes s'hauran de comprovar i limitar aquestes deformacions.

Quan es considera la integritat dels elements constructius, s'han de comprovar les limitacions de fletxa i desplaçaments horitzontals definides per el CTE DB SE 4.3.3 deformacions [18], per qualsevol combinació d'accions característica i considerant només les deformacions que es produeixen després de la posta en obra del element.

Quan es considera el confort del usuari s'han de comprovar les limitacions anteriors, per qualsevol combinació d'accions característica considerant només les accions de curta duració.

Mentre que, quan es considera l'aparença en obra s'han de comprovar les limitacions anteriors, per qualsevol combinació d'accions quasi permanents considerant totes les accions.

Aquestes combinacions d'accions esmentades es defineixen mitjançant les següents expressions.

Situació característica.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Situació quasi permanent.

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Finalment, per definir la fletxa d'un element concret d'una estructura, s'utilitzen les fórmules de resistència de materials habituals segons les condicions de contorn de l'element.

## 1.5 COMPARACIÓ ALTRES MATERIALS

Finalment, en aquest últim apartat del capítol 4, es compara el càlcul de la fusta amb el càlcul d'altres materials d'ús estructural per donar una visió més amplia i global dels avantatges i inconvenients de la fusta davant els seus competidors, els quals són, principalment l'acer i el formigó armat, dues alternatives alhora de realitzar una estructura.

Per el que fa el càlcul estructural, els estats de càrregues, els estats límits últims (ELU) i els estats límits de servei (ELS), definits en el CTE i exposats anteriorment, són els mateixos per tots els material, ja que són independents del material de l'estructura. Ara bé, en el propi càlcul del dimensionat o comprovació d'un element concret, òbviament, el material si que té rellevància, ja que segons sigui un o altre, el seu procés de càlcul és diferent.

La fusta al ser una material homogeni, és més pròxim al càlcul a l'acer, no pas al del formigó armat, ara bé per la naturalesa de la fusta els elements solen tenir una forma rectangular o quadrada, mentre que l'acer al ser un material que es pot modelar, permet perfils que amb la mínima quantitat d'acer obtenen la màxima resistència possible. Aquest motiu provoca també comprovacions locals en l'ànima o en les ales del perfil d'acer, mentre que en la fusta no són necessàries. La principal diferència entre l'acer i la fusta és la anisotropia de la fusta, mentre que l'acer ofereix les mateixes resistències amb indiferència de la direcció de l'acció. A mes a mes, l'acer és un

material molt més controlat i es pot assegurar molt millor la seva resistència oferint coeficients de seguretat molt menors que no pas la fusta, que al ser un material natural la incertesa de la resistència de l'element en concret és molt major i per tant s'han de considerar coeficients de seguretat majors i amb més quantitat.

Per altre banda, el formigó armat al estar format per dos materials, la tipologia de càlcul és molt diferent, ja que el que es comprova és la forma de ruptura, si és dúctil o fràgil, i que els dos material treballin conjuntament i solidàriament.

Finalment, i un cop analitzades les grans diferències entre materials, es compara de forma quantitativa els valors absoluts de resistència mecànica. Per tal de realitzar aquest exercici s'exposa la taula 4.1, on es comparen les tensions de càlcul en N/mm<sup>2</sup> entre la fusta laminada, l'acer i el formigó.

Taula 4.1: Comparació de les tensions de càlcul entre fusta, acer i formigó en N/mm<sup>2</sup>.

MATERIAL	FLEXIÓ	TRACCIÓ		COMPRESSIÓ		TALLANT	MÒDUL D'ELASTICITAT
		Paral·lela	Perpend.	Paral·lela	Perpend.		
Fusta laminada GL 24 h	24	16,5	0,4	24	2,7	2,7	11.600
Acer S 275	275	275		275		275	210.000
Formigó H 25	1,2	1,2		16,7		1,2	37.200

Aquesta comparació ens porta a una sèrie de conclusions, que són les següents:

La fusta és un material d'una resistència molt elevada a flexió en relació al pes propi que té, ja que el coeficient entre la seva resistència i el seu pes és de 1,30 vegades superior a la de l'acer i unes 10 vegades superior a la del formigó.

La fusta té una bona capacitat de resistència a tracció i a compressió en les direccions paral·lela les fibres, mentre que en la direcció perpendicular la seva resistència és mínima, per tant té una direcció de treball molt marcada i un error en aquest sentit pot tenir greus conseqüències, sent aquest un tret molt particular davant els altres materials que són més homogenis.

La fusta té poca resistència a tallant en relació a les tensions dels altres materials i a les altres tensions, degut a la seva accentuada anisotropia.

La fusta, també té un baix mòdul d'elasticitat en relació al formigó i molt inferior respecte l'acer. Aquest valor és la principal incidència en la deformació de l'element i les seves possibilitats de vinclament, per tant es pot dir que es neutralitza la bona resistència a compressió paral·lela a les fibres que presenta la fusta.



Aquest valors deriven en que les limitacions alhora de dimensionar també variïn segons el tipus de material. L'acer es dimensiona a flexió i posteriorment es comprova la seva resistència, mentre que el formigó tot el contrari, es dimensiona a resistència i després es comprova la fletxa. En canvi el cas de la fusta és un terme entremig, ja que depèn de la llum, del valor de les càrregues, etc. i per tant pot haver la limitació tant per fletxa com per resistència. Si que és veritat però, que en general la fusta laminada es dimensiona a fletxa i a resistència en cas d'incendi.