

# BAIXADA DE RESISTÈNCIES D'UN FORMIGÓ PROVOCAT PER LES VARIACIONS DE TEMPERATURA DURANT EL SEU CURAT I DURABILITAT RESULTANT

Cada any durant els mesos d'estiu s'ha observat que molts formigons han patit baixades de resistències molt significatives fins al punt d'haver d'enderrocar l'element estructural afectat. Aquest fenomen que es repeteix periòdicament en els mesos de més calor de l'any va lligat a la variació de temperatures que experimenta el formigó en una de les seves etapes de formació més crítiques: el seu curat. En aquest període és quan reaccionen químicament els components del formigó fresc com a reacció exotèrmica que s'ha de controlar amb el manteniment d'una adequada humitat. La importància d'un bon curat és cabdal per la seva influència decisiva en la resistència i altres qualitats del formigó resultant.

## 1. DURACIÓ MÍNIMA DEL CURAT EN ELS MESOS D'ESTIU

Segons l'art. 74 de la instrucció del formigó estructural "EHE" el curat del formigó es prolongarà durant el termini necessari en funció del tipus i classe de ciment, de la temperatura i grau d'humitat ambient. Per a una estimació de la duració mínima del curat "D" en dies, la instrucció dona la següent formulació:

$$D = K * L * Do + D1$$

on: **D** és la duració mínima de curat, en dies.

**K** és un coeficient de ponderació ambiental, d'acord amb la taula 74.4 donada.

**L** és un coeficient de ponderació tèrmica, segons la taula 74.5 donada.

**Do** és un paràmetre bàsic de curat, segons la taula 74.1 donada.

**D1** és un paràmetre funció del tipus de ciment, segons la taula 74.3 donada.

En l'anàlisi del termini mínim de curat en els mesos d'estiu, amb un ciment pòrtland amb addicions CEM-II/42.5N, relació aigua/ciment entre 0.5 i 0.6, i amb una exposició ambiental II (cas de Girona), tenim el següent resultat:

$$D = 1,00 * 1,00 * 6,00 + 1,00 = 7 \text{ dies de duració mínima del curat.}$$

## 2. VARIACIONS DE TEMPERATURA EN ELS MESOS D'ESTIU I CONCLUSIONS PRÈVIES

Segons dades facilitades pel Servei Meteorològic de Catalunya sobre variacions cada mitja hora de temperatures a la ciutat de Girona durant els mesos de juliol, agost i setembre de 2003 i 2004, podem observar les oscil·lacions de temperatures màximes i mínimes diàries en els gràfics 1, 2, 3, 4, 5 i 6 adjunts. Amb aquesta anàlisi arribem a les següents conclusions:

- Les màximes variacions de temperatures experimentades dins l'interval d'una setmana a l'estiu del 2003 fou de 22,5°C (entre els dies 12 d'agost amb una màxima de 41,2° i el 6 d'agost amb una mínima de 18,7°) i amb altres variacions de més periodicitat, mentre que en aquest recent estiu del 2004 fou de 20,7°C (entre els dies 18 d'agost amb una màxima de 35,8° i el 21 d'agost amb una mínima de 15,1°C) i amb no tantes altres variacions de menys periodicitat.
- És evident que la variació de temperatura més espectacular correspon a l'any 2003 (estiu més calorós dels darrers anys) i és evident també que els resultats de baixades de resistències que el laboratori CECAM ha observat ha estat molt superior l'any 2003 (veure article realitzat per Joaquim Romans en la revista "NIVELL" núm. 3, pàg. 15). Així la relació causa-efecte és més que evident.

## 3. INFLUÈNCIA DE LA VARIACIÓ DE TEMPERATURA EN L'ETAPA DE CURAT D'UN FORMIGÓ I EVOLUCIÓ DE LA SEVA RESISTÈNCIA

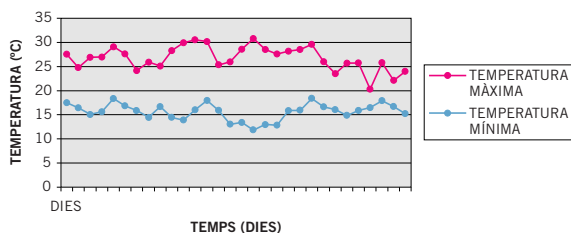
En el formigó de ciment pòrtland un curat a temperatures superiors a 30°C provoca un augment de la seva resistència inicial, però posteriorment amb el formigó ja endurit, es produeix



un descens de la seva resistència tan acusada com alta hagi estat la temperatura en la fase de curat. En canvi, i de forma contrària, amb el formigó compostat de cendres volants s'ha demostrat que aquesta pèrdua de resistència no es produeix. L'explicació d'aquest fenomen és la següent:

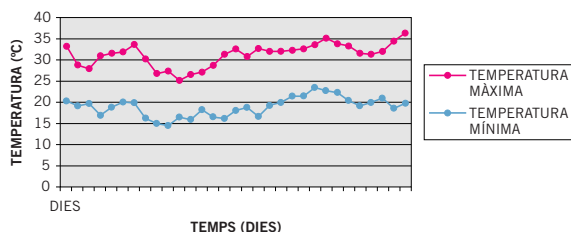
- L'efecte de la temperatura sobre la velocitat de reacció del formigó és la mateixa en el cas que s'utilitzi ciment pòrtland sense addicions que amb addicions de cendres volants. El canvi de les propietats resultants està en els productes hidratats obtinguts que són diferents si es tracta d'un formigó o l'altre.
- En els formigons amb cendres volants hi ha un efecte d'activació de la resistència, malgrat que hi hagi un canvi de temperatura que fa que la reacció química iniciada continuï i sigui superior a l'esperada (veure figura 1 adjunta).

TEMPERATURES DIÀRIES SETEMBRE-2003

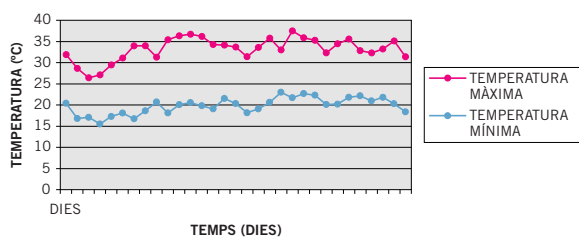


Gràfiques 1, 2 i 3: Temperatures diàries màximes i mínimes estiu 2003 a la ciutat de Girona. (font: Servei Meteorològic de Catalunya)

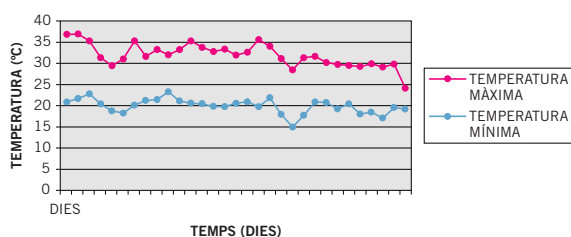
TEMPERATURES DIÀRIES JULIOL-2004



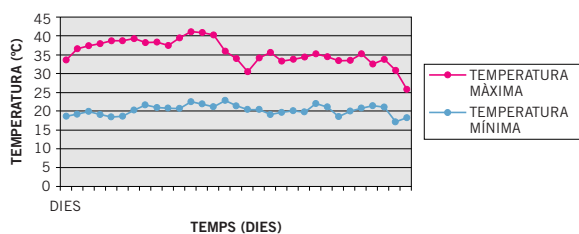
TEMPERATURES DIÀRIES JULIOL-2003



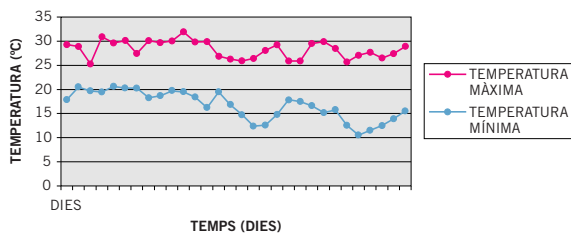
TEMPERATURES DIÀRIES AGOST-2004



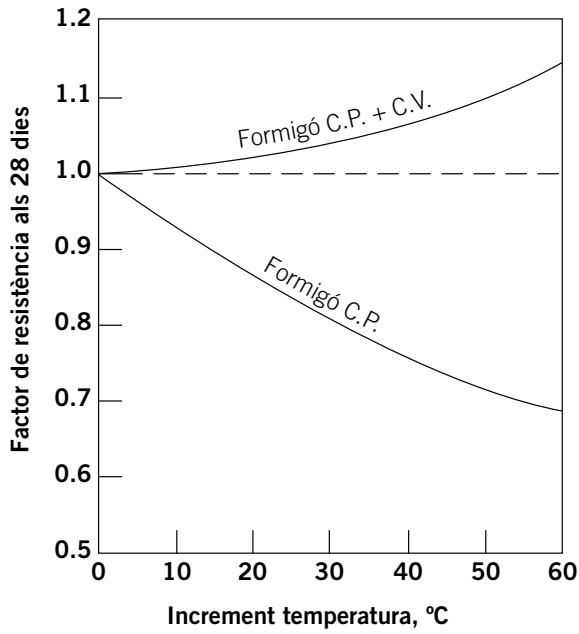
TEMPERATURES DIÀRIES AGOST-2003



TEMPERATURES DIÀRIES SETEMBRE-2004



Gràfiques 4, 5 i 6: Temperatures diàries màximes i mínimes estiu 2004 a la ciutat de Girona. (font: Servei Meteorològic de Catalunya)



**Fig. 1:** Disminució de la resistència d'un formigó de ciment pòrtland (formigó C.P.) en variar la temperatura en l'etapa del seu curat. Hi ha un efecte contrari amb els formigons de ciment pòrtland amb cendres volants (formigó C.P. + C.V.): es produeix un efecte d'activació de la resistència més gran quan hi hagi un canvi de la font de calor exterior en la fase de curat més important.

#### 4. LLIGANTS HIDRÀULICS LATENTS O "ADDICIONS": EL CAS DE LES CENDRES VOLANTS

Segons l'art. 29.2 de la instrucció "EHE" es podran utilitzar cendres volants i fum de silici com a addició en el moment de la fabricació, únicament quan s'utilitzi ciment tipus CEM-I, és a dir ciment pòrtland amb 95% mínim de clinker.

Les cendres volants són un subproducte sòlid de la pols que acompanya els gasos de combustió dels cremadors de les centrals termoelèctriques alimentats per carbons polvoritzats. El seu ús barrejat amb el ciment (màxim un 35% en pes de ciment) té els següents avantatges:

- disminució del calor d'hidratació del formigó,
- augment de la resistència a llargues edats pel seu efecte putzolànic,

- no alteració de la resistència del formigó a causa d'una variació de temperatura en el seu curat (ja comentat anteriorment)

Aquests grans avantatges per a un formigó estructural amb cendres volants queden sovint menyspreats per la manca d'una justificació del compliment del seu control de producció. Així, l'art. 29.2.1 entre d'altres components, limita la quantitat màxima de triòxid de sofre ( $SO_3$ ) i clorurs en les cendres volants a un 3 i 0,10% respectivament. Actualment a Girona i comarques, els pocs formigoners que usen aquesta addició no donen els resultats de les anàlisis i assaigs previs, malgrat que la instrucció "EHE" i ja l'anterior "EH-91" ja deien que aquests resultats haurien d'estar a disposició de la Direcció Facultativa.

Així, i per aquesta manca de transparència en el sector sobre un producte amb excel·lents propietats però amb un gran interrogant sobre la seva qualitat, i sobretot a causa de les grans dispersions de resultats per la seva naturalesa de fabricació, ens condueix a PROHIBIR-NE L'ÚS mentre continuï aquesta desinformació per part dels subministradors. Creiem que l'Administració competent hauria de fer complir aquests requeriments per al seu adequat consum, ja que és interès de l'Administració l'ús d'aquests subproductes que neixen de l'eliminació de residus en les centrals termoelèctriques, tal com es justifica en la nova norma de recepció de ciments RC-03 on es recomana l'ús de ciments amb addicions de cendres volants.





### 5. ESTRUCTURES DE FORMIGÓ ARMAT D'ALTA DURABILITAT, DURABILITAT ÒPTIMA I FORMIGÓ ADEQUAT A L'ESTRUCTURA ADEQUADA

No és suficient l'adopció d'una estratègia de durabilitat segons l'exposició a què està sotmesa qualsevol estructura de f.a. segons prescripcions de l'actual instrucció del formigó estructural (EHE) si no hi ha un adequat control de qualitat dels ingredients de què es compon un formigó: la possible reactivitat dels àrids, aigua d'amasat, ciment, addició o additiu. Així caldria definir específicament una durabilitat interna o intrínseca del mateix formigó amb independència de l'ambient o exposició a què està sotmesa: aquest és el cas d'adoptar una addició de cendres volants que compleixi rigorosament amb la UNE EN 450:95: amb les limitacions de contingut de  $SO_3$  fins a un 3%, clorurs fins a un 0,10% i òxid de calci lliure fins a un 1%. D'aquesta manera hi haurà una certesa en la passivació de l'acer, el comportament inert dels àrids, i la protecció interna que amb tota seguretat donarà el formigó al seu armat.

Amb l'entrada en vigor de la vigent instrucció "EHE" apareixen nous formigons per afrontar al problema de la DURABILITAT. Entenem com a durabilitat la protecció vers els mecanismes de transport dels agents agressius. Aquests agents poden ser externs (ambients agressius) o interns (components del formigó inadequats i que poden reaccionar adversament).

Per conduir a una correcta VIDA ÚTIL de les estructures de formigó armat i així tenir un formigó amb una durabilitat òptima, podríem definir dos nous conceptes:

- **DURABILITAT INTERNA o INTRÍNSECA DEL FORMIGÓ:**  
Quan s'ha protegit el formigó armat d'agents agressius interns, és a dir hi ha un correcte i efectiu control de qualitat dels seus components. A més caldrà mantenir el control en la seva fabricació, transport, col·locació i curat.
- **DURABILITAT EXTERNA o AMBIENTAL:**  
Quan per protegir el formigó armat dels agents agressius exteriors cal fixar un recobriments mínim de les armadures, dissenyar-ne la dosificació, perquè la resistència amb un

mínim contingut de ciment i relacions aigua/ciment baixes és un indicatiu molt clar de la impermeabilitat de la massa de formigó i per tant de la seva durabilitat.

Operant d'aquesta forma, podem parlar d'un FORMIGÓ ADEQUAT PER A L'ESTRUCTURA ADEQUADA. Vol dir que en una estructura podem tenir nombrosos ambients en relació amb el formigó col·locat i, per tant, hi podrà haver tants tipus diferents de formigó com ambients hi hagi.

Retornant al començament d'aquest article en relació amb l'elecció del ciment en un formigó sotmès a unes elevades variacions de temperatures durant el seu curat, haurem de tenir clar que les cendres volants compliran amb el factor de DURABILITAT INTERNA per garantir una resistència acceptable als 28 dies i a la vegada tindrà una certa impermeabilitat que garantirà una DURABILITAT EXTERNA.



EDUARD BONMATÍ I LLADÓ  
Arquitecte Tècnic  
Professor UdG