

ARTICLE TÈCNIC

Utilització dels assaigs no destructius en l'avaluació del grau d'afectació d'una estructura de formigó armat després d'un incendi (2a part)

Agustí Pascual Pinsach
Arquitecte tècnic

En aquesta segona part es mostra el treball realitzat amb els dos tipus de formigó, el formigó armat més habitual en obres d'edificació: HA-25/B/20/IIa i el formigó armat per a prefabricats: HA-45/-/20/IIa; i els resultats obtinguts.

◀ Nau afectada per un incendi.
FONT: laboratori CECAM.



Aquest article es va publicar a la revista num 57 que el podeu consultar en aquest enllaç:

<https://www.aparellador.cat/images/ServeisCollegiat/Publicacions/Punxa/57LaPunxa.pdf>

o utilitzant el codi QR que trobareu en aquesta pàgina.



► **En el número anterior de la revista comentàvem les característiques més remarcables i el comportament al foc d'un dels materials més utilitzats en estructures, el formigó armat.**

Vam veure que disposava d'una resistència acceptable a altes temperatures, una baixa difusivitat tèrmica, així com les transformacions experimentades, durant i després d'un incendi.

També es vam esmentar la necessitat de seguir un protocol per tal de determinar el grau d'afectació i quins assaigs podem fer per tal de poder emetre un diagnosi.

Per tal d'analitzar com es comporten a altes temperatures els diferents tipus de formigons utilitzats més habitualment a les nostres obres, al laboratori CECAM hem realitzat una sèrie d'assaigs amb dos dels tipus de formigó més habituals i prou diferents entre ells per analitzar el seu comportament:

- a) Formigó armat més habitual en obres d'edificació: HA-25/B/20/IIa.
- b) Formigó armat per a prefabricats: HA-45/-/20/IIa.

A continuació es poden veure els resultats obtinguts.

Mostra 1

Formigó HA-25/ B/20/IIa fet en planta

A les fotografies de l'esquerra podem observar la proveta després d'haver estat exposada a la temperatura indicada durant 1 hora i posteriorment refredada en aigua a 19°C-20°C durant 15 minuts. A la fotografia de la dreta, la mateixa proveta després de l'assaig a compressió realitzat, com a mínim, 7 dies més tard.



200°C

Mostra exposada a 200°C



400°C

Mostra exposada a 400°C



500°C
Mostra exposada a 500°C



600°C
Mostra exposada a 600°C



700°C
Mostra exposada a 700°C



800°C
Mostra exposada a 800°C

A la fotografia següent es pot veure el canvi de color i la degradació de la superfície soferts pel formigó. D'esquerra a dreta: 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C i 800°C.



Anàlisi visual de les mostres després de l'assaig

Temperatura	Patologia observada o efecte	Color de la superfície¹
200°C	Pèrdua de l'aigua capil·lar. No apareixen fissures superficials ni efectes visibles. A l'assaig a compressió no s'observen alteracions significatives a la massa ni als àrids.	Color gris una mica més fosc. No s'aprecien canvis visibles.
400°C	Pèrdua de l'aigua capil·lar. Despreniment de la calç viva a partir de l'hidròxid càlcic d'hidratació dels silicats. No apareixen fissures superficials ni efectes visibles. A l'assaig a compressió no s'observen alteracions significatives en la massa ni en els àrids.	Color gris fosc
500°C	S'ha perdut l'aigua intersticial i el formigó es torna porós. En l'aspecte exterior no s'aprecien canvis evidents en relació amb la mostra assajada a 400°C. La massa del formigó es desfà més ràpidament durant l'assaig de compressió.	Color gris fosc
600°C	Aspecte molt porós. Apareixen zones amb degradació superficial sobretot a les zones menys vibrades (cara superior de la proveta). Pèrdua de resistència.	Color gris clar tirant a blanc. Aspecte exterior blanquinós amb taques fosques.
700°C	Degradació superficial generalitzada. La mostra, un cop assajada a compressió, es veu poc consistent.	Color gris clar tirant a blanc. Aspecte exterior blanquinós.
800°C	El formigó ha perdut totes les seves característiques mecàniques. Degració general i pèrdua de massa. Internament presenta un color gris tirant a groguenc.	Color groguenc blanquinós

1. Cal tenir en compte que l'assaig s'ha realitzat en un forn; per tant, no hi ha fum que emmascari el color de la superfície del formigó.



Mostra 2

Formigó HA-45/ L/20/IIa fet en planta de prefabricats

A les fotografies de l'esquerra podem observar la proveta després d'haver estat exposada a la temperatura indicada durant 1 hora i posteriorment refredada en aigua a 19°C-20°C durant 15 minuts. A la fotografia de la dreta, la mateixa proveta després de l'assaig a compressió realitzat, com a mínim, 7 dies més tard.



200°C
Mostra exposada a 200°C



400°C
Mostra exposada a 400°C



500°C
Mostra exposada a 500°C



600°C

Mostra exposada a 600°C



700°C

Mostra exposada a 700°C



800°C

Mostra exposada a 800°C

A la fotografia següent es pot veure el canvi de color i la degradació de la superfície soferts pel formigó. D'esquerra a dreta: 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C i 800°C.



Anàlisi visual de les mostres després de l'assaig

Temperatura	Patologia observada o efecte	Color de la superfície ¹
200°C	Pèrdua de l'aigua capil·lar. No apareixen fissures superficials ni efectes visibles. A l'assaig a compressió no s'observen alteracions significatives en la massa ni en els àrids.	Color gris. No s'aprecien canvis visibles.
400°C	Pèrdua de l'aigua capil·lar. A més, desprendiment de la calç viva a partir de l'hidròxid càlcic d'hidratació dels silicats. Apareixen petites fissures superficials e=0,1/0,2 mm. En l'assaig a compressió s'observen algunes alteracions de color en els àrids. Alguns ja presenten una tonalitat més vermellosa.	Color gris fosc més marronós que l'anterior.
500°C	S'ha perdut l'aigua intersticial i el formigó es torna porós. En l'aspecte exterior no s'aprecien canvis evidents en relació amb la mostra assajada a 400°C. Apareixen petites fissures superficials e=0,1/0,2 mm.	Color gris fosc més marronós que l'anterior.
600°C	Aspecte molt porós. Apareixen petites fissures e=0,1/0,2 mm. Els àrids tenen un color vermellós. Pèrdua de resistència.	Color gris més fosc que a 500°C.
700°C	Aspecte exterior blanquinós. Apareixen petites fissures a les cares e=0,1/0,2 mm.	Color gris més fosc que a 500°C.
800°C	El formigó ha perdut totes les seves característiques mecàniques. Degradació parcial i pèrdua de massa als cantells. Internament presenta un color gris tirant a groguenc amb els àrids de color vermellós.	Color gris clar.

1. Cal tenir en compte que l'assaig s'ha realitzat en un forn; per tant, no hi ha fum, que emmascari el color de la superfície del formigó.



**Resultats de l'assaig amb ultrasons de la mostra a).
Formigó armat més habitual en obres d'edificació:
HA-25/B/20/IIa.**

ELEMENT		SUP.		D.TRANSMISSIÓ (mm)						d.ENTRE PAL.	TEMPS 1	TEMPS 2	TIEM. MID.	VELOCITAT	VELOCITAT MITJANA	DIFERÈNCIA ENTRE 2 CARES
PROV	TEMP	S	M	DIR	SDIR	SDIR	IND	PR	V	(mm)	(µs)	(µs)	(µs)	(Km/s)	(Km/s)	(Km/s)
1A	20°	x		99,5						100	23,5	23,4	23,45	4,24		
1B	20°	x		99,5						100	23,4	23,6	23,50	4,23	4,24	0,01
2A	20°	x		99,5						100	22,6	22,6	22,60	4,40		
2B	20°	x		99,5						100	22,8	22,9	22,85	4,35	4,38	0,05
3A	20°	x		99,5						100	22,6	22,8	22,70	4,38		
3B	20°	x		99,5						100	23,0	23,1	23,05	4,32	4,35	0,07
3A	200°	x		99,5						100	26,3	26,0	26,15	3,80		
3B	200°	x		99,5						100	26,2	26,1	26,15	3,80	3,80	0,00
4A	20°	x		99,5						100	23,2	23,2	23,20	4,29		
4B	20°	x		99,5						100	22,6	22,8	22,70	4,38	4,34	0,09
4A	400°	x		99,5						100	30,2	30,4	30,30	3,28		
4B	400°	x		99,5						100	30,7	30,9	30,80	3,23	3,26	0,05
8A	20°	x		99,5						100	23,3	23,0	23,15	4,30		
8B	20°	x		99,5						100	23,4	23,1	23,25	4,28	4,29	0,02
8A	500°	x		99,5						100	30,1	29,9	30,00	3,32		
8B	500°	x		99,5						100	30,1	29,8	29,95	3,32	3,32	0,01
5A	20°	x		99,5						100	22,6	23,0	22,80	4,36		
5B	20°	x		99,5						100	22,6	22,8	22,70	4,38	4,37	0,02
5A	600°	x		99,5						100	35,9	36,6	36,25	2,74		
5B	600°	x		99,5						100	34,1	34,0	34,05	2,92	2,83	0,18
6A	20°	x		99,5						100	22,9	22,9	22,90	4,34		
6B	20°	x		99,5						100	23,3	23,3	23,30	4,27	4,31	0,07
6A	700°	x		99,5						100	31,9	32,6	32,25	3,09		
6B	700°	x		99,5						100	33,7	34,0	33,85	2,94	3,01	0,15
7A	20°	x		99,5						100	22,9	23,0	22,95	4,24		
7B	20°	x		99,5						100	22,5	22,7	22,60	4,40	4,32	0,16
7A	800°	x		97,0						97	36,5	38,4	37,45	2,59		
7B	800°	x		98,0						98	38,2	39,4	38,80	2,53	2,56	0,06

Observacions

Les provetes 1 i 2 no s'han exposat a temperatures altes. Han servit per determinar en condicions de laboratori la velocitat de transmissió del so al formigó i la seva resistència a compressió (provetes patró).

En blau, determinació de la velocitat de transmissió del so i de la resistència a compressió a les mostres no exposades a temperatures elevades.

En vermell, determinació de la velocitat de transmissió del so i de la resistència a compressió, després d'exposar les mostres a temperatures elevades.

En fons groc, provetes amb la superfície visiblement afectada per la temperatura.

Resultats de l'assaig amb ultrasons de la mostra b). Formigó armat per a prefabricats: HA-45/-/20/IIa.

ELEMENT	SUP.	D.TRANSMISSIÓ (mm)							d.ENTRE PAL. (mm)	TEMPS 1 (µs)	TEMPS 2 (µs)	TIEM. MID. (µs)	VELOCITAT (Km/s)	VELOCITAT MITJANA (Km/s)	DIFERÈNCIA ENTRE 2 CARES (Km/s)
		PROV	TEMP	S	M	DIR	SDIR	SDIR							
9A	20°	x		99,5					100	22,5	22,3	22,40	4,44		
9B	20°	x		99,5					100	22,9	22,8	22,85	4,35	4,40	0,09
10A	20°	x		99,5					100	22,7	22,8	22,75	4,37		
10B	20°	x		99,5					100	22,4	22,3	22,35	4,45	4,41	0,08
18A	20°	x		99,5					100	22,8	22,9	22,85	4,35		
18B	20°	x		99,5					100	22,7	22,8	22,75	4,37	4,36	0,02
11A	20°	x		99,5					100	22,9	22,9	22,90	4,34		
11B	20°	x		99,5					100	22,3	22,1	22,20	4,48	4,41	0,14
11A	200°	x		99,5					100	25,2	25,2	25,20	3,95		
11B	200°	x		99,5					100	24,3	24,3	24,30	4,09	4,02	0,15
12A	20°	x		99,5					100	23,3	23,2	23,25	4,28		
12B	20°	x		99,5					100	22,6	22,6	22,60	4,40	4,34	0,12
12A	400°	x		99,5					100	30,0	29,6	29,80	3,34		
12B	400°	x		99,5					100	30,1	29,8	29,95	3,32	3,33	0,02
16A	20°	x		99,5					100	22,8	23,0	22,90	4,34		
16B	20°	x		99,5					100	22,6	22,7	22,65	4,39	4,37	0,05
16A	500°	x		99,5					100	29,4	29,3	29,35	3,39		
16B	500°	x		99,5					100	29,5	29,1	29,30	3,40	3,39	0,01
13A	20°	x		99,5					100	22,4	22,4	22,40	4,44		
13B	20°	x		99,5					100	22,6	22,6	22,60	4,40	4,42	0,04
13A	600°	x		99,5					100	39,5	38,3	38,90	2,56		
13B	600°	x		99,5					100	35,7	34,5	35,10	2,83	2,70	0,28
14A	20°	x		99,5					100	22,9	23,1	23,00	4,33		
14B	20°	x		99,5					100	22,8	22,7	22,75	4,37	4,35	0,05
14A	700°	x		99,5					100	42,9	42,9	42,90	2,32		
14B	700°	x		99,5					100	41,8	40,5	41,15	2,42	2,37	0,10
17A	20°	x		99,5					100	22,4	22,4	22,40	4,44		
17B	20°	x		99,5					100	22,4	22,4	22,40	4,44	4,44	0,00
17A	800°	x		97,0					97	54,3	51,4	52,85	1,84		
17B	800°	x		98,0					98	53,3	53,6	53,45	1,83	1,83	0,00

Observacions

Les provetes 9, 10 i 18 no s'han exposat a temperatures altes. Han servit per determinar en condicions de laboratori la velocitat de transmissió del so al formigó i la seva resistència a compressió (provetes patró).

En blau, determinació de la velocitat de transmissió del so i de la resistència a compressió en les mostres no exposades a temperatures elevades.

En vermell, determinació de la velocitat de transmissió del so i de la resistència a compressió, després d'exposar les mostres a temperatures elevades.

Resultats de la resistència a compressió

Com hem indicat abans, s'ha determinat la resistència a compressió amb dues provetes de la mostra **a)** (formigó armat més habitual en obres d'edificació: HA-25/B/20/IIa) i tres de la mostra **b)** (formigó armat per a prefabricats: HA-45/-/20/IIa) sense haver-les sotmès a temperatures elevades. Les altres provetes s'han sotmès a 200°C o temperatures superiors. Els assaigs s'han realitzat al laboratori del CECAM, segons UNE-EN-12390-1:2013, UNE-EN-12390-2:2009 i UNE-EN12390-3:2009; fabricació i conservació de provetes de formigó i ruptura a compressió i la Instrucció EHE-08.

Als quadres següents podem veure, per a les dues mostres de formigó, els valors obtinguts en l'assaig amb ultrasons i la resistència a compressió.

Cal indicar el següent:

Per a la temperatura d'assaig a 20°C ± 2°C, que correspon a la mostra sense exposar a temperatures superiors a les condicions ambientals del laboratori, el valor de la velocitat de transmissió del so és la mitjana dels valors de totes les provetes abans de l'assaig i la resistència a compressió és l'obtinguda de la mitjana de les provetes assajades de cada mostra sense haver passat pel forn.

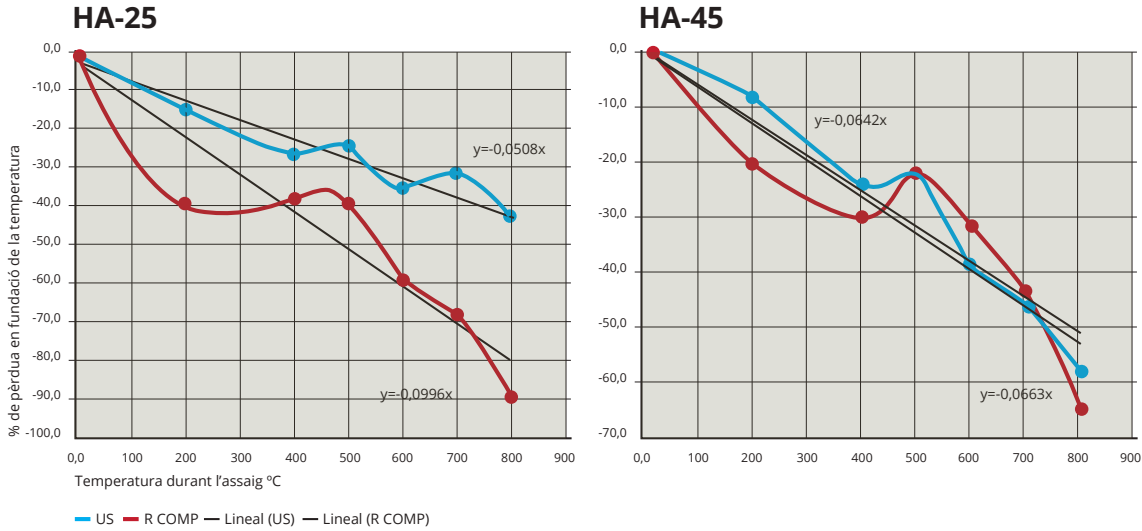
Als quadres següents podem veure, per a les dues mostres de formigó, els valors obtinguts en l'assaig amb ultrasons i la resistència a compressió.

Formigó HA-25/B/20/IIa				
Temperatura	US Km/s	COM Mpa	% US	% Mpa
20°C	4.32	48.83	0.00	0.00
200°C	3.80	30.11	-12.01	-38.34
400°C	3.26	30.34	-24.68	-37.86
500°C	3.32	30.48	-23.24	-37.58
600°C	2.83	21.12	-34.48	-56.74
700°C	3.01	15.67	-30.34	-67.91
800°C	2.56	6.02	-40.85	-87.66

Formigó HA-45/-/20IIa				
Temperatura	US Km/s	COM Mpa	% US	% Mpa
20°C	4.39	86.73	0.00	0.00
200°C	4.02	69.05	-8.40	-20.39
400°C	3.33	60.65	-24.14	-30.07
500°C	3.39	67.37	-22.72	-22.32
600°C	2.70	59.36	-38.59	-31.56
700°C	2.37	49.10	-46.05	-43.39
800°C	1.83	30.23	-58.22	-65.14

A les columnes **% US** i **% Mpa** expressem, en percentatge, la pèrdua de velocitat i la pèrdua de resistència experimentades amb la finalitat de poder establir una comparació entre aquests dos paràmetres i la temperatura.

Formigó fet en planta de prefabricats



Per regularitzar els resultats, hem traçat una línia de tendència lineal que ens permet buscar resultats entremig de les temperatures assajades. Aplicant en cada cas la fórmula de la recta $y=r*x$ obtenim els valors següents per als dos tipus de formigó:

Formigó HA-25/B/20/Ila		
Temperatura	% US	% Mpa
20°C	0.00	0.00
100°C	-5.08	-9.96
200°C	-10.16	-19.92
300°C	-15.24	-29.88
400°C	-20.32	-39.84
500°C	-25.40	-49.80
600°C	-30.48	-59.76
700°C	-35.56	-69.72
800°C	-40.64	-79.68

Formigó HA-45/-/20Ila		
Temperatura	% US	% Mpa
20°C	0.00	0.00
100°C	-6.42	-6.63
200°C	-12.84	-13.26
300°C	-19.26	-19.89
400°C	-25.68	-26.52
500°C	-32.10	-33.15
600°C	-38.52	-39.78
700°C	-44.94	-46.41
800°C	-51.36	-53.04

Com podem veure, els percentatges de pèrdua són pràcticament iguals entre la resistència a compressió de les provetes i la velocitat de transmissió del so al formigó HA-45 de la planta de prefabricats, però no així amb el formigó HA-25, que perd molta més resistència en relació amb la velocitat de transmissió del so.

El que observem és un canvi de tendència en la gràfica de ruptura a compressió i amb ultrasons a 500°C en els dos tipus de formigó, com a temperatura clau a partir de la qual el formigó ja té una degradació important.

Referent als dos formigons analitzats, el formigó de més qualitat (HA-45) de la planta de prefabricats es comporta més regularment, tot i que té una pèrdua de resistència del 32 % als 500°C, mentre que el formigó convencional (HA-25) té una pèrdua de resistència del 25 %. Aquest darrer, a partir d'aquesta temperatura, pateix una davallada de resistència molt més gran, amb més destrucció de la massa.

Consideracions, temperatures i durada de l'incendi

El foc avança sempre primer per contacte físic, després s'inflama per elevació de la temperatura ambient i finalment traspasa barreres per radiació. Quan tota la massa està cremant, s'arriba a la temperatura màxima de l'incendi. Normalment es tarda entre mitja hora i una hora.

Com hem dit abans, si en l'extinció de l'incendi es fa servir aigua, aquesta aigua pot afectar seriosament els materials.

En el cas de l'acer, és indiferent que la durada de l'incendi sigui més o menys llarga, el que realment importa és que la temperatura no superi els 700°C encara que sigui per pocs minuts. L'acer és un bon conductor i la temperatura en un punt de la superfície és instantàniament transmesa a la resta de la massa.

El formigó és un mal conductor i no és combustible i, com hem pogut veure, es degrada de manera apreciable a partir dels 500°C. Per tant, un formigó exposat a una temperatura de 800°C durant un curt període de temps queda menys afectat que un d'exposat a 500°C durant un període de temps més llarg. Generalment, quan s'arriba als 800°C a la cara exterior del formigó, a l'interior, a 3 cm de profunditat, aquesta temperatura serà bastant inferior. Per tant, la capacitat portant del formigó depèn més de la temperatura intermèdia entre la temperatura a la cara externa i la temperatura al nucli.

Les zones baixes de les estructures sempre seran més fredes que les superiors.

En edificis d'habitatges, els forjats i la paletaeria no poden arribar a dissipar, ni gairebé assumir, la càrrega de foc, ja que a temperatures superiors a 200°C la cara que radia podria ser capaç de provocar ignició, i el foc passaria a l'habitatge veí. Normalment no se superen els 300°C. El guix utilitzat com a revestiment tradicional mitiga substancialment els efectes.

El foc avança sempre primer per contacte físic, després s'inflama per elevació de la temperatura ambient i finalment traspasa barreres per radiació.

La quantitat de superfície exposada té una estreta relació entre el volum i la superfície exposada; un espessor petit serà molt més sensible al foc. Quan baixa la temperatura exterior en elements de gran volum o secció, la temperatura interna es manté més temps.

Sempre és millor dissipar que confinar. En naus industrials amb estructures de tancament i cobertes lleugeres, es pot dissipar millor la calor.

Durant l'assaig, la proveta s'ha mantingut a la temperatura indicada durant una hora. A la realitat es necessita un temps mínim per arribar a aquesta temperatura en obra. Normalment s'arriba als 500°C de temperatura ambient en 25 minuts, es tarda molt més a arribar als 800°C i pot ser que, quan la temperatura ambient arribi als 800°C a la superfície del formigó, a 1 cm de profunditat s'estigui a una temperatura de 500°C. Cada formigó, com hem pogut veure, es comporta de manera diferent.

Lògicament, els resultats d'aquest treball corresponen a les mostres assajades. Per generalitzar, caldria analitzar un nombre molt superior de mostres i intentar apropar-nos al màxim possible a la realitat.

Agraïm la col·laboració de:
CECAM, BOSSE i Prefabricats Planas.



**Durant
l'assaig, la
proveta s'ha
mantingut a la
temperatura
indicada
durant una
hora.**

Bibliografia

Instrucción EHE-08.

MIGUEL RODRÍGUEZ, José Luis de. «De la resistencia a fuego de edificios». Consell Superior d'Investigacions Científiques.

ALONSO, M. C.; FLOR LAGUNA, V. «Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio». Consell Superior d'Investigacions Científiques.

ERCOLANI, G. D.; ORTEGA, N. F.; SEÑAS, L. «Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas». Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina.

FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, Rafael. «Evaluación estructural y reparación de inmuebles dañados por el fuego». IEDC.