

Projecte - Treball final de carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 2002

Títol: Avaluació estructural d'un panell de façana de formigó de molt altes prestacions reforçat amb fibres (UHPFRC)

Document: Memòria

Alumne: Marc Prat i Casellas

Director/tutor: Miquel Llorens i Sulivera

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

Convocatòria (mes/any): Setembre 2015

INDEX MEMÒRIA

INDEX MEMÒRIA	1
1. INTRODUCCIÓ.....	4
1.1 Antecedents.....	4
1.2 Objecte.....	5
1.3 Abast	5
2 FORMIGÓ DE MOLT ALTES PRESTACIONS REFORÇAT AMB FIBRES (UHPFRC).....	6
2.1 Famílies formigó d'alt rendiment	7
2.2 Tecnologia del UHPFRC.....	9
2.2.1 Composició	9
2.2.2 Microestructura.....	10
2.2.3 Cicle de curat	11
2.3 Propietats mecàniques	12
2.3.1 Resistència mecànica.....	12
2.3.2 Millora en la durabilitat	16
2.3.3 Altres propietats destacables	17
2.4 Aplicacions	18
2.4.1 Evolució en la història.....	18
2.4.2 Principals aplicacions.....	20
3 CAS EXPERIMENTAL COM A PANELL DE FAÇANA.....	24
3.1 Panells de façana	24
3.1.1 Panells de façana prefabricats amb formigó.....	24
3.1.2 Classificació panells de façana.....	25

3.2	Cas experimental amb panell prefabricat de UHPFRC	26
3.3	Modelització del panell mitjançant el programa ANSYS	31
3.3.1	Característiques del model.....	32
3.3.2	Resultats obtinguts.....	33
4	TREBALL EXPERIMENTAL REALITZAT AL LABORATORI	35
4.1	Introducció.....	35
4.2	Objectius de l'estudi experimental.....	35
4.3	Caracterització del material.....	36
4.3.1	Panells formigó UHPFRC.....	36
4.3.2	Panell poliestirè extruït	38
4.4	Preparació dels assaigs	39
4.4.1	Instrumentació	39
4.4.2	Disposició de la instrumentació	42
4.4.3	Càrrega aplicada i condicions de contorn	44
5	ASSAIGS PANELLS DE FAÇANA.....	48
5.1	Assaig 1. Placa de formigó UHPFRC.....	48
5.1.1	Resultats obtinguts.....	48
5.1.2	Càlcul mòdul de Young	57
5.2	Assaig 2: Placa UHPFRC unit a una placa aïllant de poliestirè extruït	61
5.2.1	Resultats obtinguts.....	63
5.2.2	Càlcul mòdul de Young	68
5.3	Comparació dels assaigs	71
6	Models amb ANSYS dels assajos.....	73
6.1	Model primer assaig	73

6.2	Model segon assaig.....	82
7	ESTUDI ECONÒMIC.....	88
7.1	GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete).....	88
7.2	Estudi econòmic.....	89
8	RESUM DEL PRESSUPOST	91
9	CONCLUSIONS	92
10	DESENVOLUPAMENTS FUTURS	94
11	BIBLIOGRAFIA	95

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

En aquest treball es fan servir dues plaques fabricades amb formigó de molt altes prestacions reforçat amb fibres, conegut com UHPFRC (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*). Aquest formigó presenta unes propietats que el fan apte per un gran nombre d'aplicacions tan en el camp de l'arquitectura com de l'enginyeria de la construcció.

El formigó ha sigut un dels materials més utilitzats en el món de la construcció i durant les últimes dècades ha experimentat una gran evolució. Les resistències mecàniques que s'aconsegueixen actualment no es poden comparar amb les de fa uns anys enrere i la gamma de formigons és molt més gran, el que permet abastar un ampli marc de possibles aplicacions.

Degut a que fins fa relativament poc es creia que la única característica que determinava la qualitat d'un formigó era la seva resistència mecànica, les grans evolucions que s'han aconseguit al llarg de la història han estat relacionades amb aquesta propietat. Però actualment, els estudis ja no es centren únicament en augmentar la resistència, sinó que es busca aconseguir millorar en moltes altres propietats. Aquest creixement en la investigació de altres requisits com la durabilitat, la seguretat, la resistència a factors ambientals o l'estalvi en material ha impulsat el desenvolupament del UHPFRC.

El formigó UHPFRC és un dels últims avenços en la tecnologia del formigó i aborda les principals deficiències que podem trobar entre el formigó usual: baixa relació entre resistència i pes, baixa ductilitat i baixa resistència a tracció; igual com també s'ha aconseguit millorar en la permeabilitat, aconseguint un material gairebé impermeable.

Tot i que la primera aplicació d'aquest material la trobem a la dècada dels 90, a l'any 1997, a Sherbrooke, Canadà, utilitzat juntament amb formigó usual per a la

construcció d'una passarel·la per vianants, encara és un material en fase de desenvolupament.

1.2 Objecte

L'objecte del treball és estudiar i avaluar de forma numèrica i experimental el comportament d'un panell de façana realitzat amb UHPFRC. El projecte té doncs, dos objectius principals:

- Ampliar el coneixement personal sobre aquest nou material i les seves aplicacions en l'àmbit de la construcció.
- Determinar la idoneïtat del UHPFRC en l'aplicació mencionada – la fabricació d'un panell de façana – mitjançant l'avaluació d'un prototip. Es farà èmfasi en la viabilitat tècnica i econòmica de la solució.

1.3 Abast

Les passes a seguir per dur a terme el treball seran les següents:

- Recerca bibliogràfica sobre el material; caracterització de les propietats.
- Definició de les característiques exigibles al panell de façana de UHPFRC.
- Modelització numèrica del prototip.
- Assaig experimental en condicions de laboratori.
- Conclusions del treball i definició de futurs desenvolupaments.

2 FORMIGÓ DE MOLT ALTES PRESTACIONS REFORÇAT AMB FIBRES (UHPFRC)

Un dels últims avenços en la tecnologia del formigó és el formigó de molt altes prestacions reforçat amb fibres (UHPFRC). Tot i que el formigó armat s'ha convertit en un material molt fiable, robust, polivalent i adequat per la majoria d'aplicacions pràctiques, la gamma de necessitats a la que ha de respondre s'ha expandit en els darrers anys i factors com la resistència mecànica i la durabilitat es consideren insuficients per certes obres.

El UHPFRC aborda les principals deficiències que trobem actualment en els formigons convencionals i permet arribar a resistències mecàniques més elevades, reduir la quantitat total de materials, augmentar la ductilitat i també millorar la durabilitat, el que permet disminuir els costos de manteniment i l'impacte de les infraestructures sobre el medi ambient. A més de les qualitats anteriors, el UHPFRC també és un material gairebé impermeable, el que evita deterioraments en cicles de congelació-descongelació, corrosió i entrada de productes químics.

En la taula 1 podem veure la comparativa entre algunes propietats del UHPFRC, el HPC (formigó d'alt rendiment) i NSC (formigó de resistència normal).

La millora en la durabilitat de les estructures de formigó és el factor que més impacte ha causat en el camp de la construcció. Poder fabricar estructures que aguantin les condicions climàtiques més desfavorables permet reduir moltíssim els costos de manteniment i també el temps d'inactivitat en cas de necessitat de reparació. Si posem l'exemple de l'estructura d'un pont en països on es registren temperatures molt baixes, aquest és un factor a tenir molt en compte.

Propietats del material	NSC	HPC	UHPFRC
Resistència a la compressió (MPa)	42,8	132,4	180-225
Resistència a la flexió (MPa)	6,2	13,9	40-50
Coefficient de Poisson	0,11-0,21	-	0,19-0,24
Coefficient de fluència	2,35	1,6-1,9	0,2-0,8
Porositat	20-25%	10-15%	2-6%
Mòdul de Young (GPa)	13 - 41	31 – 55	50-55
Mòdul de ruptura, primera esquerdada (MPa)	2,75 – 4,2	5,5 – 8,3	16,5 - 22
Ductilitat	-	-	250 vegades > NSC

Taula 1. Comparativa de propietats entre diferents classes de formigó

2.1 Famílies formigó d'alt rendiment

Els desenvolupaments continus dels formigons s'han beneficiat de dos grans evolucions: la millora en la gradació dels agregats i la reducció de la relació aigua-ciment. En la taula 2 podem veure la comparativa d'aquests dos aspectes entre diferents classes de formigó.

Característiques del material	NSC	HPC	UHPFRC
Diàmetre màxim de l'agregat (mm)	18-25	10-15	<1
Relació aigua/ciment	0,40-0,70	0,24-0,35	0,14-0,27

Taula 2 Característiques de les diferents classes de formigó

El formigó d'altres prestacions va ser desenvolupat per primera vegada amb reactius en pols amb els que es van aconseguir resistències a la compressió de l'ordre de 29 a 116 MPa. Encara que l'ús de fibres per reforçar l'estructura no milloren la resistència a la compressió, si que ajuden en la millora de la ductilitat i resistència a la tracció.

La gamma de formigons que en l'actualitat estan en estudi i evolució és molt gran. Podem dir que el formigó UHPFRC és un material que apareix producte de les tres principals tecnologies que estan en desenvolupament: els formigons auto compactats, els reforçats amb fibres i els d'alta resistència.

En la figura 1 veiem les tres grans famílies de formigó que estan en desenvolupament i els productes generats per al seva combinació.

- UHSC (*Ultra High Strength Concrete*) i HSC (*High Strength Concrete*): formigó d'ultra alta resistència.
- SCC (*Self Compacting Concrete*): formigó autocompactant.
- FRC (*Fiber Reinforced Concrete*): formigó reforçat amb fibres.

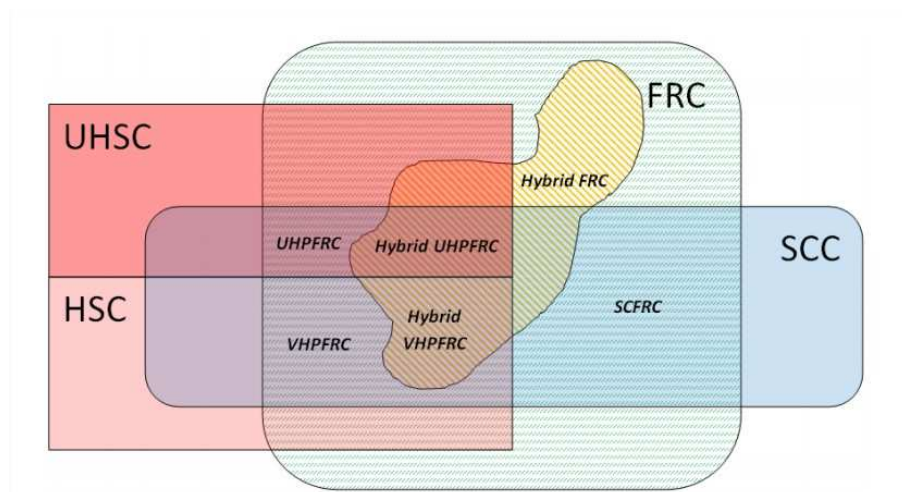


Figura 1 Famílies de desenvolupament del formigó

L'UHPFRC és combinació del formigó d'alta resistència, l'autocompactant i el reforçat amb fibres. Dins de l'UHPFRC podem trobar diferents subproductes, entre ells pot variar la quantitat d'aigua, la longitud i densitat de les fibres, la gradació dels àrids utilitzats, etc. Per exemple, dins d'aquest ventall trobem el cas del UHPFRC híbrid el qual està format per fibres de diferent tipus i/o dimensions.

Per tant podem trobar un gran ventall de productes dins del formigó UHPFRC, degut a l'elevat cost que té i que en moltes de les aplicacions no és necessari explotar al màxim totes les seves propietats.

Així trobem molts diferents comercialitzats al mercat, que provenen de diferents empreses que han adaptat el producte a les seves pròpies necessitats.

2.2 Tecnologia del UHPFRC

2.2.1 Composició

Tot i que el formigó UHPFRC es considera un material relativament nou, part dels seus constituents són molt semblants als de un formigó de alta resistència normal com: ciment pòrtland, fum de silici, aigua i sorra fina. No obstant, aquest també inclou quars mòlt, fibres i plastificant.

Tot i haver-hi gran varietat en la composició del material depenent de quina sigui l'empresa fabricant i les necessitats de l'aplicació, podríem dir que la composició més típica és la que trobem a la taula 3.

Material	Quantitat (kg/m ³)	Tan per cent en pes (%)
Ciment pòrtland	712	28,5
Sorra fina	1020	40,8
Fum de silici	231	9,3
Quars mòlt	211	8,4
Superplastificant	30,7	1,2
Accelerador	30	1,2
Fibres d'acer	156	6,2
Aigua	109	4,4

Taula 3. Composició típica del UHPFRC

La definició dels constituents es basa en gran part en la optimització de la barreja granular. Es busca que el granulat utilitzat en la barreja sigui molt fi, eliminant els

agregats gruixuts, i així aconseguir una mescla amb una matriu molt homogènia, el que resulta una distribució de tensions més uniforme quan està carregat.

El material granulat amb major diàmetre és la sorra fina que generalment està entre 150 i 600 micres. El següent material que trobem és el ciment, que de mitjana fa 15 micres i tot seguit trobem el quars amb un diàmetre mitjà de 10 micres. Les partícules més petites són les de fum de silici el qual té un diàmetre prou petit com per posar-se en els espais buits que deixen el ciment i el quars mòlt. Dimensionament, el constituent més gran són les fibres que com a valor mitjà tenen un diàmetre de 0,2 mm i una longitud de 12,7 mm.

El cost del UHPFRC és molt elevat en comparació amb el formigó usual. La composició d'aquest és la causa major d'aquesta gran diferència en el cost, en conseqüència s'han fet grans esforços per minimitzar els costos del material sense sacrificar les propietats més beneficioses del UHPC.

2.2.2 Microestructura

Des de punt de vista de la ciència dels materials, les grans propietats d'un material venen determinades per la seva microestructura, i així passa amb el formigó de molt alta resistència. Les bones propietats mecàniques i la alta durabilitat, que a continuació descriurem, resulten de la seva densa matriu i compacte microestructura.

La principal diferència en la microestructura entre el formigó usual i el UHPC és que en el de molt alta resistència trobem una porositat total menor i absència de porus capil·lars, espais que originalment estaven ocupats per aigua. Això és degut a la baixa relació aigua-ciment. Aquesta reducció en la porositat és el principal factor que dona una alta resistència a la penetració i als cicles de congelació-descongelació.

Una altre diferència important es troba en la zona de transició entre la mescla i les partícules d'agregat. En el UHPC la zona de separació és d'un rang molt més petit i això permet que les fibres estiguin estretament envoltades per la matriu i es generi una

forta unió. Per tant el treball de les fibres és molt més efectiu i això permet millorar la ductilitat del material.

2.2.3 Cicle de curat

Gairebé qualsevol mesclador de formigó usual barrejarà correctament el formigó UHPC. Tot i això, cal tenir en compte que el formigó de molt alta resistència necessita una aportació d'energia extra en comparació amb el convencional, de manera que s'incrementarà el temps de treball. Aquest increment d'energia i les reduïdes dimensions de l'agregat obliguen a fer alguna variació en el procediment per evitar que el formigó es sobreescalfi molt durant la mescla. Aquest és un punt important ja que un dels cicles més determinants perquè les propietats del formigó siguin les desitjades és el seu curat.

Es consideren dos components essencials en el cicle de curat, la temperatura i la humitat. Com passa amb qualsevol material compost de ciment, mantenir la temperatura adequada és fonamental per aconseguir la velocitat desitjada de reaccions.

El curat es produeix en dues fases:

- La fase inicial consisteix en mantenir una temperatura adequada que impedeix la pèrdua d'humitat fins l'estabilització i permet un creixement ràpid de les propietats mecàniques.
- La segona fase pot o no incloure temperatures elevades i ambient d'alta humitat, depenent de si es vol accelerar l'obtenció de les característiques desitjades.

Graybeal va estudiar quatre procediments de curat diferents per determinar les propietats del material en funció d'aquest. L'estudi consistia en curar al vapor a 90°C i 60°C durant 48 hores començant 24 hores després de l'elaboració de la mescla, curat al vapor a 90°C, començant 15 dies després del curat estàndard i curar a temperatures ambient de laboratori.

Els tres mètodes de curat al vapor van augmentar les resistències a la compressió i el mòdul d'elasticitat, va disminuir la fluència, la retracció total va ser nul·la i es va aconseguir un augment de la resistència a l'abradió. Les millores aconseguides per el vapor a temperatura més baixa i el curat retardat van ser lleugerament menors.

Aconseguir formigons UHPC que arribin a resistències a compressió de l'ordre de 200 MPa requereix de procediments de curat especials. Schachinger et al. va observar que un curat inicial a 20°C durant 5 dies, seguit de un curat amb calor a 50-65°C és la combinació més favorable per aconseguir altres resistències.

Heinz et al. va aconseguir resistències a la compressió de l'ordre de 200 MPa després de 8 hores a 20°C seguir de 8 hores més en aigua a 90°C.

Per tant, les propietats del UHPC es veuen afectades pel mètode, la durada i el tipus de curat. Igual que amb el formigó usual, l'enduriment tèrmic accelera el desenvolupament de la força i propietats relacionades. Retardar l'aplicació de calor durant diversos dies pot millorar les propietats mesurades, tot i que pot no ser compatible amb la producció ràpida en les operacions de prefabricació.

2.3 Propietats mecàniques

A continuació farem un repàs de les principals propietats mecàniques del formigó UHPFRC i les repercussions que aquestes tenen en les seves aplicacions:

2.3.1 Resistència mecànica

2.3.1.1 Resistència i comportament a compressió

L'alta resistència a la compressió és una de les propietats més destacables. A diferència del formigó usual, que la seva resistència a la compressió es troba aproximadament entre 28 i 55 MPa, diversos estudis realitzats durant el 2003 per Perry i Zakariassen demostren que el formigó UHPFRC pot arribar a suportar esforços de compressió de 170 a 230 MPa. Aquesta teoria va ser reforçada per Kollmorgen durant el 2004 quan va

demostrar que la resistència a la compressió del formigó UHPFRC està per sobre els 190 MPa.

Aquest augment en la resistència és degut sobretot als components dels quals està format el formigó i la millora en l'esquelet granular que s'ha aconseguit crear, sense deixar cap espai buit. Un altre punt important és la reducció de la relació aigua-ciment, que disminueix la mida dels porus, fent que no hi hagi interconnexió entre ells i generant una mescla consistent. En la figura 2 veiem la relació entre el rati aigua-ciment i la resistència a la compressió i com ha evolucionat en els darrers anys.

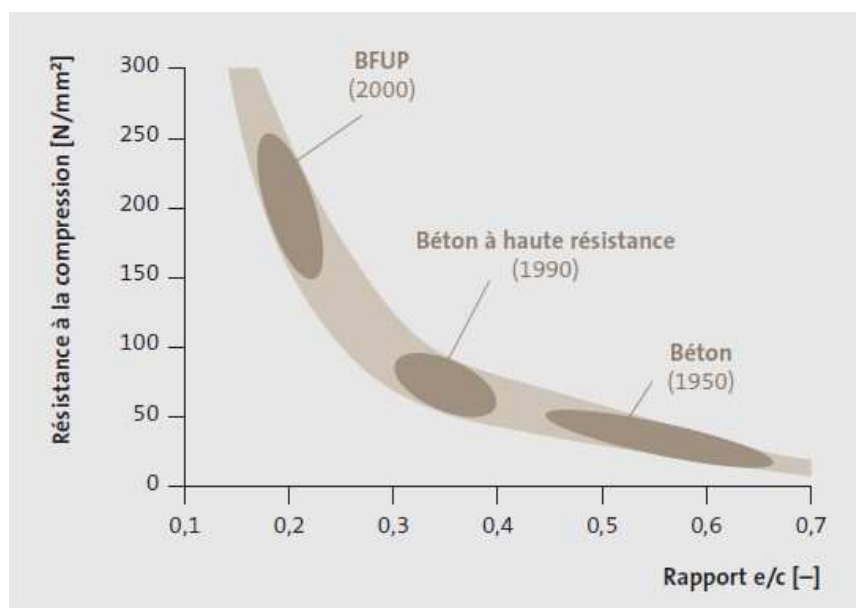


Figura 2. Resistència a la compressió respecte la relació aigua-ciment en l'evolució del formigó

Graybeal (2005) va descobrir que aplicant un tractament tèrmic durant 48 hores, a 90°C i amb una humitat relativa del 95% s'aconseguia augmentar la resistència a la compressió fins a un 53% respecte el formigó no tractat. Aquest considerable augment ha obert encara més les portes al formigó de molt alta resistència en l'enginyeria de la construcció i ha permès poder eliminar en molts casos l'armadura de reforç, generant així un estalvi important de material.

En la figura 3 veiem una relació de seccions transversals amb la mateixa resistència a la compressió construïdes amb formigó armat, formigó pretensat, acer i formigó d'ultra alta resistència. Queda clar que la reducció de material utilitzat és important.

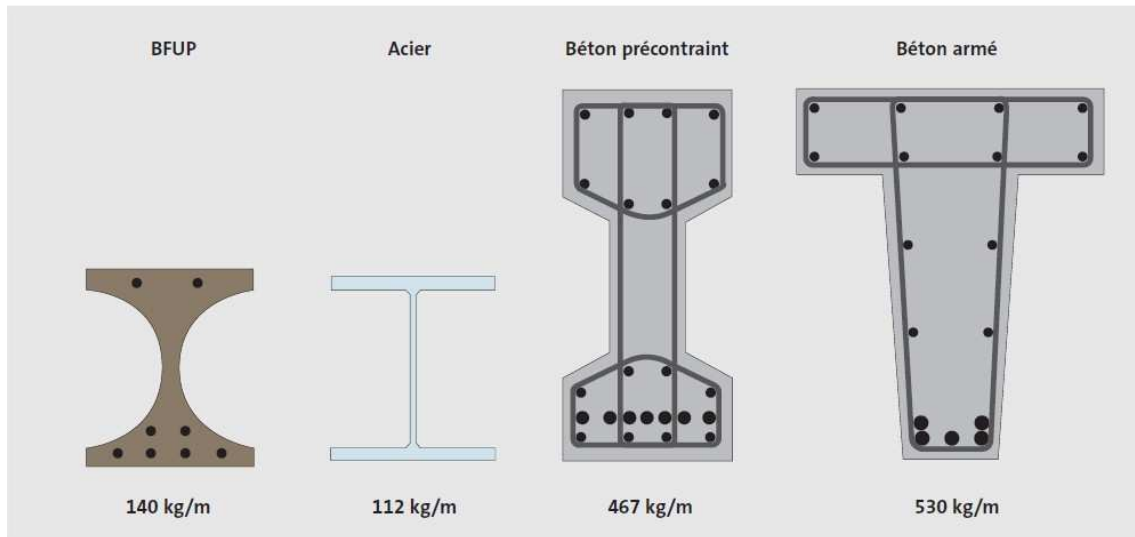


Figura 3. Seccions transversals de diferents formigons amb la mateixa resistència a la compressió

El comportament elàstic en la compressió es manté fins a aproximadament el 75% de la carrega màxima. En la figura 4 veiem quin és el comportament a compressió del formigó d'alta resistència en funció del percentatge de fibres.

Es pot arribar a deformar aproximadament de 3,5 a 5 ‰.

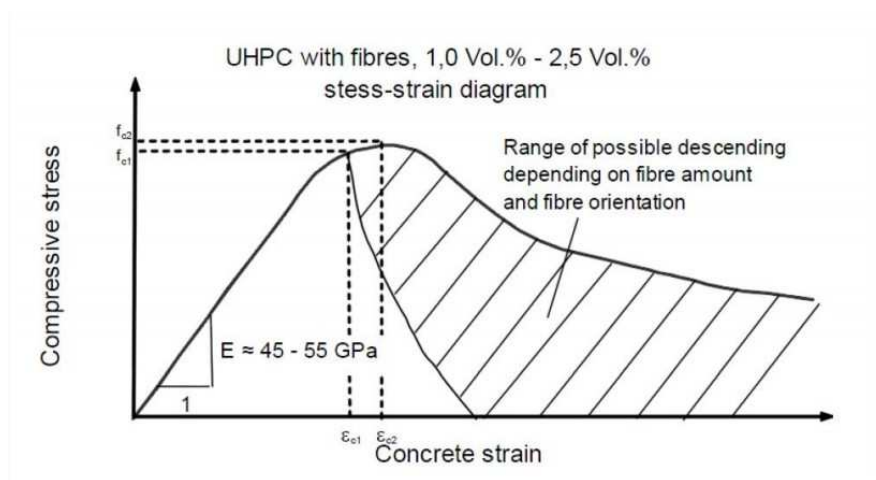


Figura 4. Comportament del UHPFRC a compressió en funció del percentatge de fibres

2.3.1.2 Resistència i comportament a tracció

S'ha demostrat que la resistència a la tracció és 3 o 4 vegades superior a la d'un formigó usual i pot arribar a valors de 10 a 12 MPa. Aquesta elevada resistència a la tracció del UHPFRC la donen les fibres que el componen. Sense aquestes fibres el formigó segueix sent extremadament fràgil.

El comportament a tracció presenta tres etapes clarament diferenciades: comportament elàstic, una etapa d'enduriment quan apareixen les primeres esquerdes i una última d'estovament un cop ha trencat.

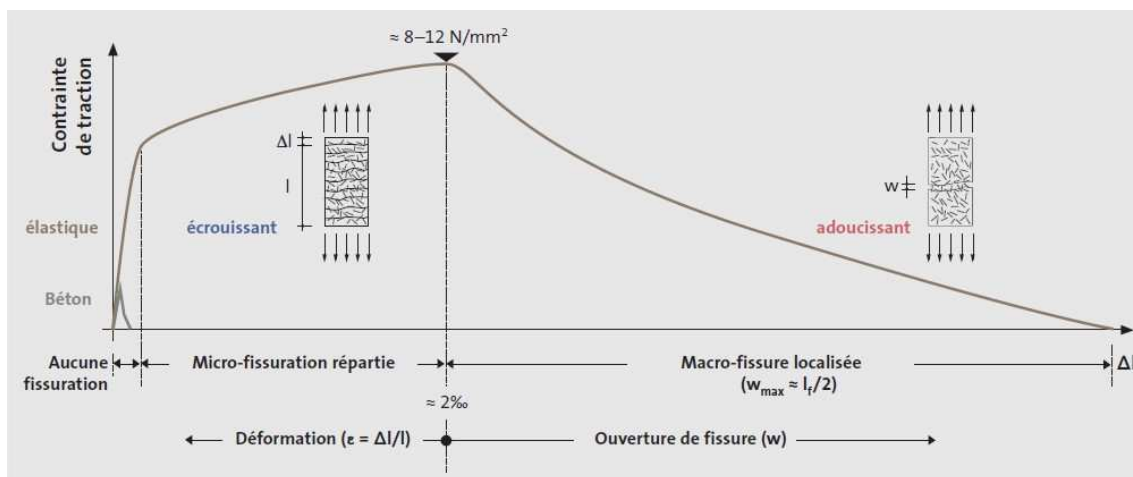


Figura 5. Comportament del UHPFRC a tracció

Un cop assolit el límit de resistència a la tracció es produeix un trencament de la matriu. En aquest punt les fibres tenen poca influència, la tensió es produeix en règim lineal i la deformació és mínima.

El final del règim elàstic coincideix amb la primera microfissura en el punt de menys resistència. A mesura que apareixen més petites fissures, les fibres asseguren una microfissuració repartida i pràcticament invisible que generen un alt increment de la deformació del material. El formigó d'ultra alta resistència reforçat amb fibres té la capacitat d'allargar-se aproximadament un 2‰ abans de l'inici de l'estovament. No és fins el punt que les fibres han plastificat que no apareix la primera fissura. Aquest paràmetre depèn tant de la quantitat de fibres, del seu diàmetre i de la tipologia.

Un cop assolida la resistència màxima, la deformació es concentra en una sola fissura la qual s'obre progressivament amb un estrip de les fibres. L'esforç de tracció disminueix gradualment amb l'obertura de les fibres fins a caure a zero amb el trencament total. En aquesta etapa, l'obertura màxima de l'esquerda és igual a la meitat de la longitud de la fibra.

2.3.2 Millora en la durabilitat

Tal com abans hem comentat, en l'actualitat no és la resistència mecànica l'única propietat en la que es destinen recursos per aconseguir millores importants, si no que es valoren molts altres aspectes. Una de les que més importància ha agafat en el camp de l'evolució del formigó estructural és la seva durabilitat.

L'ACI (Institut Americà del Formigó) defineix la durabilitat del formigó com la capacitat que aquest té per resistir la intempèrie, l'atac químic, l'abradió i altres processos de deteriorament. Per tant podem dir que la durabilitat d'un formigó és la capacitat que té per continuar realitzant les seves funcions mantenint la seva estabilitat dimensional en un entorn determinat.

Podem classificar els principals deterioraments que pot patir en dos grans grups:

- Deterioraments físics:
 - o abradió
 - o cicles de congelació i descongelació
 - o foc
 - o cristal·lització
- Agents químics:
 - o agents de reacció àlcaci-sílíce
 - o corrosió de l'acer
 - o migració de ions de clorur a través del formigó
 - o atac de sulfats

- formació d'entringida diferida; fenomen degut a l'atac intern dels sulfats que conté el ciment als aluminats del mateix provocant un atac virtual de sulfats

Les evolucions en la tecnologia del formigó han fet que el UHPFRC sigui molt més resistent a tots els factors esmentats i així, comparat amb la resta de formigons, tingui una durabilitat molt més elevada que li permet ser utilitzat en aplicacions i estructures que mai abans s'havien dissenyat amb formigó.

A més, aquest augment de la durabilitat comporta també un augment important en la vida útil de l'estructura i per tant una reducció en els costos de manteniment com en les vegades que cal fer reparacions, molt important en certes aplicacions.

2.3.3 Altres propietats destacables

Lligat amb les propietats esmentades podem destacar les següents característiques del UHPFRC:

- L'alta resistència mecànica ens porta a una important reducció de les seccions, entre el 60 i el 75% respecte el formigó usual. Això té una gran repercussió en la sostenibilitat del material ja que, tot i que el formigó d'alta resistència utilitza 3 vegades més ciment, el volum total es redueix a la tercera part. Així el consum de ciment es manté, però s'aconsegueix un estalvi important en la resta de matèries que el conformen.
- Aquesta reducció de volum comporta:
 - una reducció del pes total dels elements. Per tant les necessitats i costos tan en els fonaments com en els equips d'elevació disminueixen considerablement ja que les exigències seran menors.
 - elements esvelts que donen un valor estètic més elevat que les construccions robustes del formigó usual. També amplia l'espai útil ja que l'utilitzat en les estructures és menor.

- Ductilitat elevada proporcionada per les fibres. Aquesta ductilitat permet una millor distribució dels esforços interns i per tant un component més que augmenta la seguretat del formigó.
- Molt alta treballabilitat.
- El seu alt contingut en àrids fins fa que sigui auto compactant.

2.4 Aplicacions

2.4.1 Evolució en la història

La gran evolució dels formigons d'alta resistència ha fet que les àrees d'aplicació del UHPFRC siguin molt variades i cada vegada més àmplies, aprofitant l'augment en la resistència, durabilitat i capacitat de flexió. La seva versatilitat ha fet que fins ara s'hagi utilitzat estructures artístiques, panells acústics, elements prefabricats, ponts per a vianants i també per el pas de vehicles. En cada un d'aquest casos, el formigó UHPFRC pot ser utilitzat sol o pot funcionar com a estructura mixta, treballant juntament amb formigó usual, bigues metàl·liques o altres materials.

Tot i que, fins a dia d'avui, la majoria d'aplicacions per les quals ha estat utilitzat aquest material han estat destinades i dissenyades par aprofitar l'alt augment en la resistència, cada vegada més el mercat s'està beneficiant d'altres propietats, sobretot de la seva alta durabilitat.

El desenvolupament del UHPFRC va començar a la dècada dels 90 i és el 1997 quan trobem la seva primera aplicació. Aquesta primera estructura la trobem a Sherbrooke, Canadà i va ser utilitzat juntament amb formigó usual per a la construcció d'un pont per a vianants.



Figura 6. Exemple aplicació UHPFRC: pont per a vianants a Sherbrooke, Canadà

Durant el mateix any, el formigó de molt alta resistència es va sotmetre a un test de durabilitat al ser utilitzat per substituir les bigues d'acer de les torres de refrigeració de la planta d'energia de Cattenom, França. El fet que va fer decantar per l'elecció d'aquest material va ser la seva alta durabilitat, ja que l'ambient a suportar era extremadament corrosiu. L'objectiu principal era reduir de manera considerable, i fins i tot eliminar, el manteniment de l'estructura. Tres anys després de la reconstrucció, un equip de treball va viatjar fins a la zona per comprovar l'estat del formigó i va poder observar que aquest no havia patit cap deteriorament (Resplendino i Petitjean 2003).

En els anys següents, durant el principi del segle XXI, trobem molts més casos on s'ha utilitzat el formigó UHPC per la construcció d'estructures de trànsit com ponts i passarel·les. Trobem aplicacions d'aquest estil a Corea del Sud, Japó, França i Alemanya.

La construcció del primer pont per el pas de vehicles la trobem a l'any 2001 a França. És el pont de Borug Les Valence, d'aproximadament 45 metres de longitud.

Des de la dècada del 2000, diversos països s'han compromès en l'aplicació del formigó de molt alta resistència. A França s'han construït una gran quantitat d'estructures com façanes, ponts i plaques. Als EEUU ha crescut molt la seva aplicació en el desenvolupament de les infraestructures de carreteres. A Austràlia s'ha desenvolupat

la realització d'estructures per ponts. Països com Holanda, Suïssa, Canadà, Alemanya, Japó i Corea han utilitzat el UHPC per la construcció de ponts i reforç *in situ* d'estructures i a la Xina s'ha usat per la producció de plaques de coberta dissenyades per ser utilitzades la llarg dels ferrocarrils d'alta velocitat.

Amb les creixents aplicacions del UHPFRC estan apareixen una gran gamma de diferents formulacions per poder satisfer totes les necessitats. A més, aquesta dosificació dels components es va variant per tal d'ajustar-se a les necessitats individuals de cada aplicació.

2.4.2 Principals aplicacions

A causa del bon rendiment del formigó UHPC, les seves aplicacions estan augmentant gradualment en els últims anys, especialment a Europa, Amèrica del Nord i Japó. Les principals construccions on actualment el podem trobar són ponts, edificis i en reforços estructurals, i també en algunes aplicacions especials. A continuació descriurem i posarem exemples de les principals aplicacions.

2.4.2.1 Ponts

Les propietats mecàniques avançades i la durabilitat del UHPFRC permeten que mètodes convencionals de construcció d'elements comuns en ponts es replantegin per afegir UHPC. Moltes investigacions han anat enfocades a trobar dissenys òptims dels elements utilitzant formigó de molt alta resistència. D'acord amb un informe publicat a els EEUU per l'Administració Federal de Carreteres el 2013, trobem 55 ponts construïts o que estaven en construcció a EEUU i Canadà, 22 a Europa i 27 a Àsia i Austràlia.

En aquesta aplicació el podem trobar treballant com a panells de coberta, capes protectores, juntes entre els diferents component, bigues, etc.

Si els comparem amb els ponts de formigó armat tradicional, els ponts construïts amb UHPC presenten una aparença mes prima, un pes molt menor, una implementació simplificada i una major durabilitat.

En la figura 7 podem veure un exemple de un pont típic construït amb UHPC.

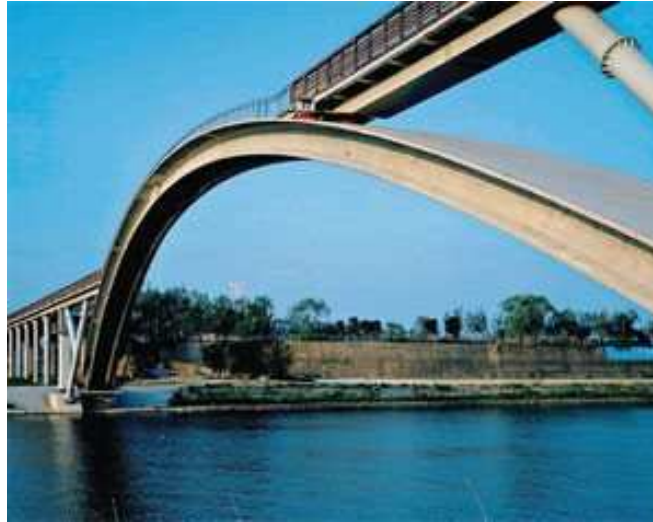


Figura 7. Pont per vianants amb UHPC (Seül, Corea del Sud)

2.4.2.2 Edificis

A més de la seva utilització en ponts, el formigó de molt alta resistència també té una gran aplicació en components per la construcció d'edificis, com ara elements de façana, de revestiment i de sostre. En la última dècada ha sigut una aplicació molt utilitzada ja que el UHPFRC permet crear estructures molt primes, duradores i estètiques.

Un dels nous edificis que utilitzen aquest material és la *Fondation Louis Vuitton pour la Creation*, a París. Aquest projecte es caracteritza per l'alta complexitat geomètrica. El revestiment exterior està format per 19000 panells prefabricats amb UHPC, cada un diferent als altres, modelat de forma individual. A la figura 8 podem veure una imatge d'aquest edifici.



Figura 8. Fondation Louis Vuitton pou la Creation, París, França

Un altre exemple és el Museu de les Civilitzacions d'Europa i la Mediterrània, que es troba a la zona del port de Marsella, França. Les façanes en forma d'arbre, les columnes, suports, una passarel·la per vianants i fins i tot proteccions als punts d'ancoratge són fets amb UHPC.

Aquests són dos clars exemples d'aplicació en l'edificació, però en podem trobar molts altres on s'ha utilitzat per panells de façana, sostres, revestiments, etc.

2.4.2.3 Reforç estructural

El UHPFRC també s'ha utilitzat per reparar i reforçar ponts construïts amb formigó armat o pretensat. El seu ús augmenta les propietats mecàniques i la seva durabilitat, reduint així el manteniment.

La primera aplicació la trobem en un pont a Suïssa on originalment la coberta no tenia capa impermeable i parts d'aquest van quedar danyades per la corrosió. L'estructura del pont es va reforçar amb UHPC per aprofitar al seva alta impermeabilitat i així eliminar el problema. Després de la rehabilitació el pont ha resistit bé sense cap més problema estructural.

Des de llavors, en molts ponts deteriorats s'ha utilitzat el formigó de molt alta resistència per reparar i reforçar l'estructura.

De la mateixa manera, el UHPC també es podria utilitzar per reparar i protegir estructures hidràuliques, com túnels en rius, preses, etc.

2.4.2.4 Aplicacions especials

Tenint en compte les excel·lents propietats d'aquest material, podem trobar aplicacions en casos especials. Per exemple, al llarg de la via dels ferrocarrils d'alta velocitat de la Xina s'ha utilitzat el UHPC per fabricar les plaques de coberta, aprofitant la seva alta resistència i la densa microestructura. A França s'ha utilitzat com a reforç de les parets de contenció de un reactor nuclear.

També el trobem en moltes aplicacions marines per la seva alta resistència en ambients agressius. S'han dissenyat molins de vent al mar i rehabilitat estructures de senyalització marítima.

3 CAS EXPERIMENTAL COM A PANELL DE FAÇANA

3.1 Panells de façana

3.1.1 Panells de façana prefabricats amb formigó

Entenem per façana qualsevol parament exterior d'un edifici que té com a principals funcions treballar com a separació i aïllament entre l'exterior i l'interior tant tèrmicament com acústicament, així també actuant de protecció solar, del vent, pluja, fums, seguretat, etc. Per altre banda també és molt important tenir en compte les seves funcions estètiques: forma, color i textura.

Els panells prefabricats de formigó poden ser utilitzats com a tancament total o parcial d'un edifici i hauran de complir totes els funcions anteriorment descrites, tan estructurals com estètiques. Seran molt importants les seves propietats de durabilitat dels materials que el constitueixen, així com el seu manteniment, les resistències mecàniques i el comportament contra el foc.

Podem classificar els panells en dos tipus: portants o autoportants, segons si transmeten càrregues verticals o sols es limiten a la funció de tancament. Generalment trobarem panells autoportants, es a dir, que només resisteixen el seu propi pes i les accions derivades dels factors externs.

Tot i que l'evolució important dels panells de façana prefabricats ha sigut durant els últims anys, aquests són una idea tan antiga com la prefabricació en si. Durant el 1875, Lascelles ja va plantejar els primers panells de façana. Però no és fins a principis dels anys cinquanta que els dissenys agafen una certa importància en el món de la construcció. A nivell pràctic, la primera aplicació important es troba a Marsella durant el 1952, quan Le Corbusier utilitza panells per la construcció d'unitats d'habitatge. Els països més importants en el desenvolupament són Estats Units, França, Anglaterra i els països nòrdics.



Figura 9. Unitats d'habitatge de Marsella, Le Corbusier, 1952

En general, la tendència que s'ha tingut en l'evolució dels panells prefabricats de formigó ha sigut cada vegada crear unitats més grans i per tant de major pes.

3.1.2 Classificació panells de façana

Podem classificar els panells de façana en dos tipus, panells portants o autoportants.

3.1.2.1 Panells resistents o portants

Els panells portants són elements de façana que, apart de fer de tancament de l'edifici, actuen com elements estructurals i per tant, suporten i transmeten les càrregues verticals dels pisos i estructures. També poden contribuir a l'estabilitat horitzontal de l'edifici. Per tant aquests requeriran un anàlisi adequat per comprovar que la combinació de la flexió i la compressió són admissibles per l'element.

3.1.2.2 Panells no resistents o autoportants

Els panells autoportants només suporten les accions del vent, l'estabilitat horitzontal i les càrregues de neu i tèrmiques. També poden rebre càrregues d'elements a suportar o altres accions de l'exterior. El fet de no actuar com elements estructurals fa que es

puguin eliminar de la construcció sense afectar a l'estabilitat del conjunt ni l'estructura. Es limiten a complir la funció de tancament.

El pes i les accions calculades s'han de transmetre directament a l'estructura de suport de l'edifici. En aquest cas cada panell es subjecte individualment a la resta i entre ells no hi ha contacte per evitar que en el cas de una deformació puntual aquesta es transmeti al llarg de la façana.

3.2 Cas experimental amb panell prefabricat de UHPFRC

En el cas experimental contem amb un panell prefabricat amb formigó UHPFRC. L'objectiu serà comprovar experimentalment i analíticament que aquest panell pot treballar com a panell de façana d'un edifici de 20 metres d'altura situat a la província de Girona.

Tal com hem comentat en el capítol anterior, podem diferenciar entre dos tipus de panells. En el nostre cas d'estudi, la placa de formigó actuarà com un panell autoportant, per tant només caldrà que tinguem en compte l'acció del vent, ja que el seu propi pes l'aguantarà l'estructura de l'edifici.

El primer pas serà definir quines són les característiques dimensionals i situació geogràfica de l'edifici en el qual estudiarem la instal·lació dels panells de formigó UHPFRC. Les dades utilitzades són les següents:

- Altura edifici: 20 metres
- Amplada edifici: 20 metres
- Situació geogràfica: Celrà (Girona)

Per calcular l'acció del vent sobre l'estructura utilitzarem el programa de l'Eurocodi, descrit en l'Annex A.

El primer pas serà obtenir la velocitat bàsica del vent mitjançant l'equació 1:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (\text{Eq. 1})$$

Per obtenir el valor fonamental de la velocitat bàsica del vent haurem d'anar a mirar el mapa que ens proposa el CTE-2006 (Codi Tècnic de l'Edificació), ja que tot i que en la primera versió dels Eurocodis sí que s'adjuntava un mapa definint les velocitats bàsiques de cada zona, en la última actualització deixen que el criteri vingui donat per el codi tècnic de cada país.

Per tant, si consultem el mapa que ens ofereix el CTE-2006, la velocitat bàsica del vent a Girona és de 29 m/s.

Per simplificar el càlcul considerarem els coeficients c_{dir} i c_{season} iguals a 1, per tant la velocitat bàsica del vent és:

$$v_b = 29 \text{ m/s}$$

Hem suposat que l'edifici està situat en el poble de Celrà (Girona) i la zona on està construït la podem classificar dins la categoria II de les definides per l'EC-1. La categoria II es refereix al les àrees amb vegetació baixa (herba) i obstacles aïllats, amb separació major de 20 vegades l'altura dels obstacles. Per tant obtenim els valors dels coeficients de rugositat:

$$z_o = 0,05$$

$$z_{min} = 2$$

Un cop tenim el valor de la velocitat bàsica i hem definit en quina categoria de terreny ens trobem podem calcular el valor de la pressió de la velocitat bàsica:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \text{ on } \rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 29^2 = 525,625 \text{ N/m}^2$$

Amb la pressió a velocitat bàsica, calcularem la pressió pic mitjançant l'equació 2:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Per trobar la pressió pic, a part de la pressió de la velocitat bàsica, ens caldrà calcular la velocitat mitjana del vent i la intensitat de turbulència a l'altura z.

Sabem que la velocitat mitjana del vent s'expressa amb l'equació 3:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (\text{Eq. 3})$$

I la intensitat de turbulència és:

$$l_v = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Per tant, si a l'equació 2 que defineix la pressió pic hi introduïm les equacions 3 i 4 referents a la velocitat mitjana i la intensitat de turbulència obtindrem l'equació 5:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \right] \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b)^2 \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

On:

$$c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \text{ i } c_o = 1$$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_o}{0,05}\right)^{0,07}, \text{ per tan:}$$

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \right] \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \right) \cdot \left(0,19 \cdot \left(\frac{z_o}{0,05} \right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \right)^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Substituïm les variables per les dades del cas estudiat:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{20}{0,05}\right)} \right] \left(\frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 29^2 \right) \cdot \left(0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{20}{0,05}\right) \right)^2$$
$$q_p(z) = 1,47 \text{ KN/m}^2$$

En el nostre cas només ens interessa la pressió que fa el vent en la superfície exterior, on actua directament el vent. L'actuació del vent en les superfícies exteriors la trobarem amb l'equació 7:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (\text{Eq. 7})$$

On:

- z_e és l'altura de l'edifici per calcular la pressió pic.
- c_{pe} és el coeficient de pressió exterior i depèn de l'àrea en que actua la pressió del vent. El trobem definit en taules per àrees de 1 m^2 i 10 m^2 . Per valors diferents a aquests haurem de utilitzar la gràfica de la figura 10.

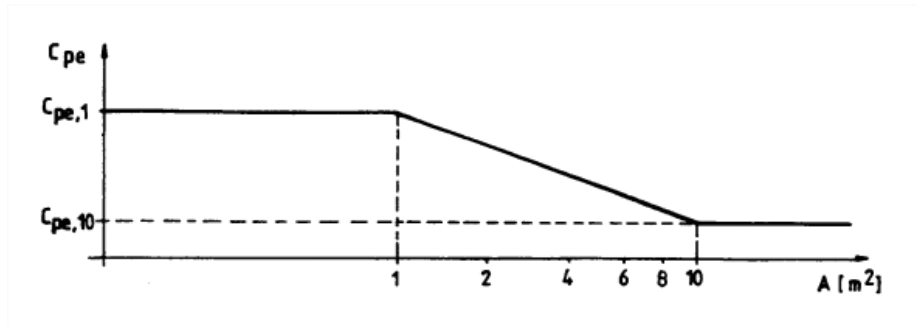


Figura 10. Gràfica coeficient de pressió exterior

El valor del coeficient de pressió també canvia tan de valor com de signe segons quina sigui la cara de l'edifici a estudiar. En la figura 11 veiem les diferents cares d'actuació que haurem de relacionar amb el valors de la taula 12 per trobar la pressió total de vent.

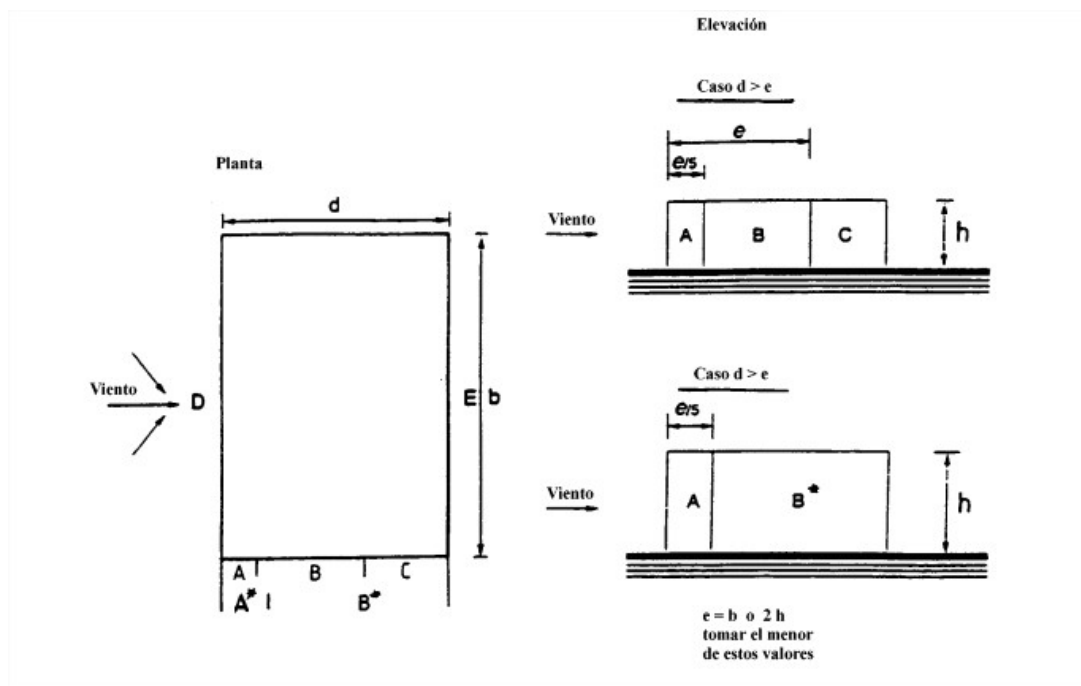


Figura 11. Zones de pressió del vent en l'edifici

Ens interessa la pressió feta en la cara D, que és el cas més crític. Per trobar el valor de C_{pe} utilitzarem la taula 4.

Zona	A		B, B*		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
≤ 1	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,8	+1,0	-0,3	
≥ 4	-1,0	-1,3	-0,8	-1,0	-0,5		+0,6	+1,0	-0,3	

Taula 4. Coeficients pressió del vent

En el nostre cas el coeficient valdrà 1.

Per tant,

$$w_e = 1,47 \cdot 1 = 1,47 \text{ KN/m}^2 = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

Aquesta pressió obtinguda serà la que utilitzarem per avaluar el panell de façana i estudiar quin és el seu comportament.

3.3 Modelització del panell mitjançant el programa ANSYS

Abans de dur a terme un assaig experimental és necessari realitzar un estudi preliminar del problema que desitgem investigar per tal d'entendre el seu comportament i poder delimitar els paràmetres que governen en l'assaig. Així també coneixerem de forma aproximada els resultat que obtindrem durant la realització de l'experiment (càrregues màximes, reaccions, deformacions màximes...) per poder adaptar la col·locació de la instrumentació a les provetes. Per tan s'ha dut a terme una modelització de l'assaig amb el programa d'elements finits ANSYS.

S'ha utilitzat l'element solid65 del programa, descrit en l'annex C del projecte, el qual ens permet, amb l'opció *Concrete*, estudiar el comportament lineal del material introduint uns límits de tracció i compressió per quan es superin el material falli. Així aconseguirem bons resultats, simplificant el model.

Hem representat la geometria dels panells que disposem al laboratori de construcció amb un sol element solid65 amb la finalitat de tenir una primera idea dels resultats que obtindrem als assaig posteriors, amb dimensions 1000 x 1000 x 10 mm.

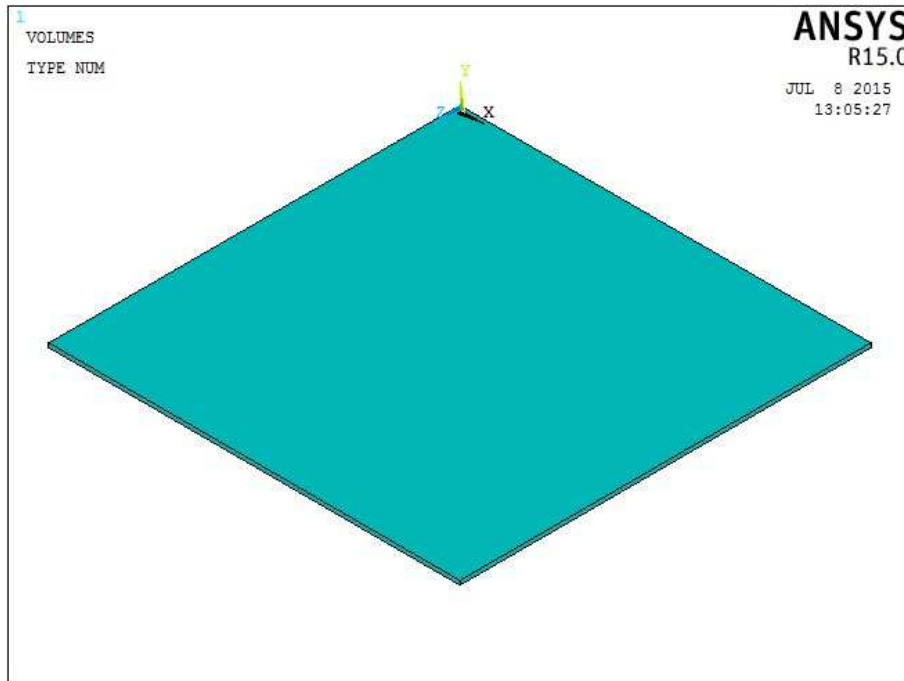


Figura 12. Model del panell de formigó UHPFRC

3.3.1 Característiques del model

Com que no disposem de les característiques del material que utilitzarem al laboratori, hem utilitzat les propietats mecàniques generals del formigó UHPFRC. Les dades que hem introduït al programa són:

Mòdul elàstic:	55000 MPa
Coefficient de Poisson:	0,19
Tensió límit a compressió:	180 MPa
Tensió límit a tracció:	10 MPa

La pressió aplicada és la obtinguda en l'apartat anterior quan hem calculat l'acció del vent sobre la façana, $1,47 \text{ KN/m}^2$.

S'han estudiat els models que posteriorment es té previst assajar al laboratori. Per tant amb el programa ANSYS hem recolzat el panell per dues arestes oposades. Un cop tinguem comparats els resultats experimentals amb els obtinguts mitjançant l'ANSYS, i

podem donar aquests per bons, estudiarem altres models, amb diferents condicions de contorn i propietats, sense necessitat de fer l'assaig experimental.

En l'annex B es descriu pas a pas el treball fet amb el programa ANSYS per modelitzar el panell de façana i obtenir els resultats que es presenten a continuació.

3.3.2 Resultats obtinguts

Especialment ens fixarem en el desplaçament vertical màxim obtingut i quines són les tensions a tracció màximes que ha de suportar el panell en aquestes condicions.

Referent a la deformació de la placa, el desplaçament vertical màxim és de 1,72 mm. En a figura 13 podem veure el panell deformat.

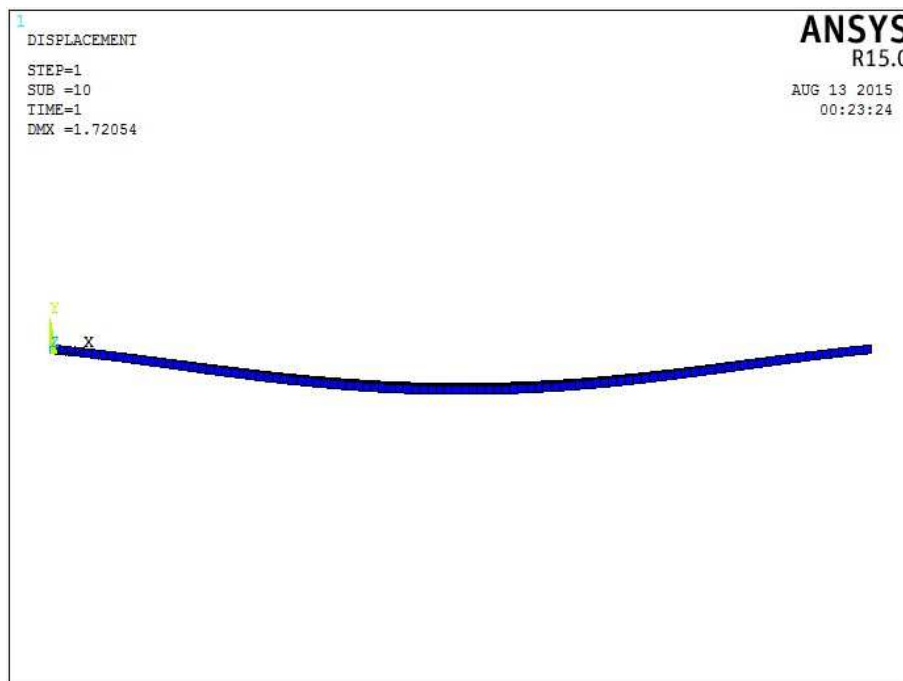


Figura 13. Deformació del panell en el primer model

Un cop ens fem una idea de quina serà la deformació que obtindrem és important fixar-nos també en les tensions a tracció màximes que haurà de suportar la placa, ja és el cas on la resistència del formigó és menor. En la imatge 14 veiem les tensions en l'eix perpendicular a les arestes recolzades per la part inferior del panell. Com ens

indica l'escala de colors, la màxima tensió serà de 4,9 MPa, per tant es queda lluny dels 10 MPa que hem definit com a límit de ruptura.

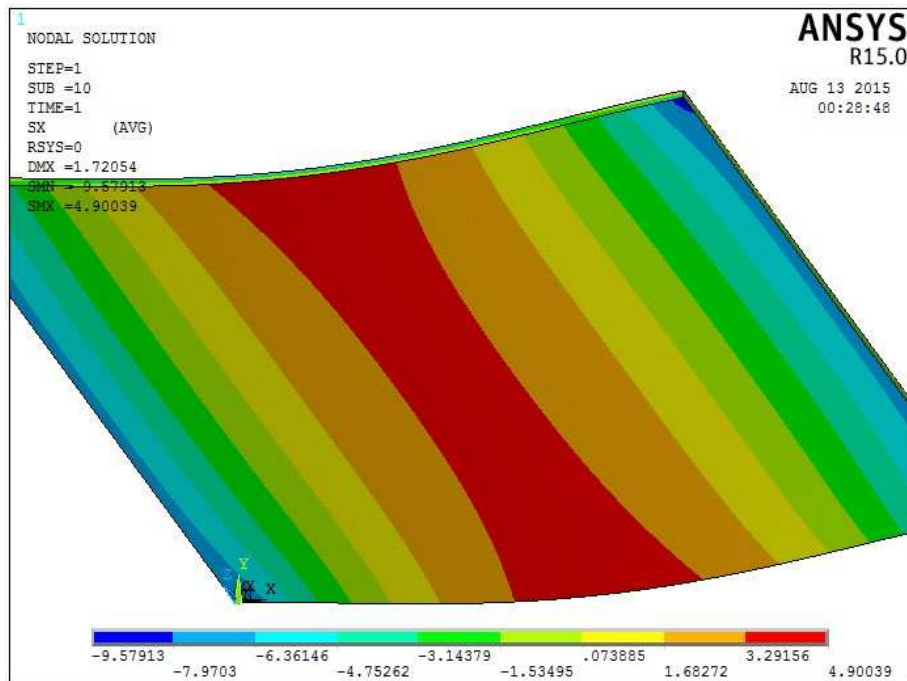


Figura 14. Tensions a tracció en l'eix X (perpendicular a les arestes recolzades)

Aquests resultats de desplaçament vertical i tensió màxima són del node 253 situat just en el centre del panell, en una de les dues arestes no recolzades.

Amb aquests valors tindrem una primera idea del que obtindrem a l'assaig al laboratori, sabem aproximadament quina serà la deformació i que amb la càrrega de $1,47 \text{ KN/m}^2$ no arribarem al trencament del material.

4 TREBALL EXPERIMENTAL REALITZAT AL LABORATORI

4.1 Introducció

En el següent capítol descriurem els assajos experimentals duts a terme amb dos panells fabricats amb formigó de molt alta prestacions reforçat amb fibres amb l'objectiu principal d'estudiar quin és el comportament d'aquests quan treballa en les condicions de panell de façana. Per dur-ho a terme s'han aplicat les càrregues teòriques que ha de suportar un panell de façana calculades en el capítol anterior amb les condicions de contorn amb les quals està previst que en un futur treballi.

Al ser panells que s'utilitzaran com a elements de façana, aquest portaran a la part interior una aïllant tèrmic i sonor que també contribuirà a suportar les càrregues aplicades. Per tal de poder avaluar quina és l'aportació de l'aïllant en el comportament estructural de la placa, hem dividit el treball experimental en dos casos:

- Estudi d'un panell de formigó de molt alta prestacions reforçat amb fibres.
- Estudi d'un panell de formigó de molt alta prestacions reforçat amb fibres unit a una placa de poliestirè extruït.

En ambdós casos, per tal de poder comparar correctament els resultats obtinguts, el treball experimental que s'ha dut a terme ha sigut exactament el mateix.

A continuació es descriurà la geometria i propietats dels materials utilitzats per la realització de l'estudi i també la metodologia que s'ha dut a terme durant tot el procés. Finalment, es conclourà el capítol amb la descripció dels resultats obtinguts i un anàlisi d'aquests.

4.2 Objectius de l'estudi experimental

En tot el procés de documentació hem pogut veure que el formigó de molt alta resistència és un material molt adequat en un gran camp d'aplicacions degut a la seva

elevada resistència mecànica tan a compressió com a tracció, la seva alta ductilitat i comportament en diferents entorns.

Els principals objectius de l'estudi experimental són:

- Comprovar que les plaques de formigó, amb unes dimensions determinades, poden treballar com a panells de façana
- Avaluar el comportament del formigó de molt altes prestacions reforçat amb fibres en un assaig a tracció.
- Avaluar la contribució estructural d'una placa d'aïllant en el panell de formigó.

4.3 Caracterització del material

4.3.1 Panells formigó UHPFRC

Per a la realització d'aquest estudi s'han utilitzat dues plaques de UHPFRC fabricades amb la mateixa dosi de cada un dels components. Per tant podem suposar d'un inici que les propietats mecàniques com el coeficient de Poisson i el mòdul de Young són idèntiques entre una i altre. Al no ser dues plaques comercialitzades de proveïdor no disposem d'aquests valors amb antelació per poder fer els models numèrics correctament, per tant inicialment, en el capítol 3.3 hem agafat un valor aproximat que un cop fet l'assaig podrem ajustar.

La geometria de les plaques és la següent:

- Llargada: 1000 mm
- Amplada: 1000 mm

En la imatge 15 podem apreciar la geometria de una de les dues plaques que utilitzarem per els assaigs al laboratori de construccions.



Figura 15. Placa de formigó UHPFRC utilitzada en l'assaig al laboratori de construccions

El que ens varia d'una placa a l'altre i ens pot portar problemes per comparar resultats és el seu gruix. Per poder fer una bona comparativa entre els dos estudis, les dues plaques haurien de ser idèntiques en la seva composició i dimensions. Com ja hem comentat, la composició és la mateixa i les dimensions, exceptuant el gruix, també. La diferència entre ambdues plaques la podem observar en la figura 16.



Figura 16. Diferència de gruix entre plaques

També cal tenir en compte que el gruix no és constant al llarg dels panells, en el centre hi ha més material que en els extrems. En l'estudi pràctic ho tindrem en compte quan traiem conclusions dels resultats obtinguts, en l'estudi mitjançant el càlcul d'elements finits agafarem un gruix mig, definit en la taula 5:

	Gruix centre	Gruix extrems	Gruix mig
Placa 1	15 mm	13 mm	14 mm
Placa 2	12 mm	7 mm	9 mm

Taula 5. Determinació dels gruixos per els estudis analítics

Per intentar avaluar millor l'aportació de la placa de poliestirè utilitzarem la placa més prima per fer la segona part de l'estudi i la placa més gruixuda la estudiarem sola, sense placa aïllant.

4.3.2 Panell poliestirè extruït

En el segon assaig on utilitzem una placa rígida de poliestirè extruït com a element aïllant per tal de avaluar quina és la seva contribució, s'han fet servir dues plaques URSA XPS NW E de dimensions 1250x600x40 amb mecanitzat lateral mascle-femella.



Figura 17. Detall placa poliestirè extruït

La fitxa tècnica del material es pot trobar en l'annex D del projecte.

4.4 Preparació dels assaigs

4.4.1 Instrumentació

4.4.1.1 Galga extensomètrica

La instrumentació per estudiar els panells consta de diferents elements. En primer lloc disposem de galgues extensomètriques que tenen la funció de mesurar les deformacions del formigó durant el desenvolupament de l'assaig. Les tensions d'un material no es poden mesurar d'una forma directa, sinó que s'han d'obtenir a partir d'altres paràmetres físicament mesurables. Per aquest motiu, per un anàlisi experimental de tensions ens és necessari calcular les deformacions mitjançant galgues extensomètriques, així com altres paràmetres del material amb el fi d'obtenir l'estat tensional sota una determinada càrrega.

Hi ha una gran varietat de galgues extensomètriques i és important escollir bé depenent de l'estudi que es vulgui dur a terme. En un primer moment hem de tenir en compte quina informació volem obtenir, per tal d'escollir la forma de la galga. Si coneixem la direcció de les tensions principals i només ens interessin aquestes podem utilitzar galgues unidireccionals, mentre que en els casos on ens trobem que la distribució de deformacions és complexa podem usar galgues triaxials.

En el nostre cas, com que anteriorment hem fet el model mitjançant el programa ANSYS i tenim clar quines deformacions volem estudiar i en quin eix es produeixen, escollim la galga unidireccional.

També és important alhora d'escollir la galga el material que hem d'estudiar i les condicions i tipus d'assaig.

En funció dels assajos que hem de dur a terme, el tipus de galgues utilitzades tenen les següents característiques:

Tipus	Resistència (Ω)	Factor de galga	Sensibilitat transversal
PFL-10-113LT	120 \pm 0.5	2.12 \pm 1%	0.5%

Taula 6. Característiques galga extensomètrica

En la figura 18 podem veure una imatge de la galga unidireccional utilitzada en l'assaig.



Figura 18. Galga unidireccional utilitzada en l'assaig

Havent escollit les galgues a utilitzar, també és molt important tirar correctament el tipus d'adhesiu que farem servir per col·locar-les. L'adhesiu utilitzat és el recomanat, CN (cianoacrilat).



Figura 19. Cianoacrilat utilitzat per adherir la galga a la placa de formigó

En l'annex E es descriu pas a pas la correcta instal·lació de les galgues a l'element a estudiar. És molt important fer els passos de col·locació de la galga correctament ja que una mala instal·lació ens pot dur a una mala lectura dels resultats. Al ser un procés llarg i complicat és important que abans de començar ens assegurem que la galga a utilitzar no sigui defectuosa, per tant, mitjançant el tester, comprovem que les resistències interiors marquin el valor teòric, en el nostre cas 120 ohms.



Figura 20. Comprovem amb el tester el correcte funcionament de les galgues

4.4.1.2 Transductor de desplaçament

Per mesurar els desplaçaments verticals al llarg de desenvolupament de l'assaig es posicionarà un transductor de desplaçament. Aquest aparell ens transformarà la senyal física de moviment en una senyal elèctrica.

En el nostre assaig s'ha utilitzat únicament un transductor col·locat a la part central de la placa, punt on trobarem el desplaçament vertical màxim.

Prèviament, abans d'iniciar l'assaig s'ha calibrat el transductor i s'ha comprovat que les mesures que prenia eren les correctes. Ho hem fet mitjançant patrons; un cop muntat el transductor a la seva zona i connectat a l'equip de mesura, hem fet els zeros i hem comprovat que la distància que calculava era idèntica a la del patró utilitzat.

Igual com hem fet amb la galga, per posicionar correctament l'aparell hem traçat l'eix en el qual volíem trobar els valors i l'hem ajustat. Per tal que el transductor no treballés sobre una zona rugosa hem col·locat una platina de metall just en el punt de recolzament del transductor.



Figura 21. Transductor de moviment utilitzat als assaigs

4.4.2 Disposició de la instrumentació

Abans de seguir tots els passos de instal·lació dels aparells de mesura hem de tenir clar la seva posició. En els dos assaigs duts a terme hem utilitzat la mateixa disposició ja que les dades que volem obtenir també són idèntiques.

L'objectiu és col·locar la galga extensomètrica en el punt més crític i on la placa de formigó més patirà per suportar les carregues aplicades. Com ja sabem, el formigó a compressió és un material que treballa molt bé i per tant no serà un punt crític; així que ens interessarà calcular les tensions a tracció, que tot i que el formigó de altes prestacions augmenta molt la seva resistència, és el punt més crític.

Ja sabem que al aplicar una càrrega distribuïda amb les condicions de contorn que tenim, la cara que treballarà a tracció és la oposada a la que apliquem la força i que la direcció principal de les tensions serà perpendicular a les dues arestes recolzades. Tot i això, abans de l'estudi, en el capítol 3.3 hem modelitzat l'assaig amb el programa ANSYS i amb els resultats obtinguts hem escollit la zona correcte.

Així, amb la finalitat de calcular les tensions a flexió i també d'intentar trobar les primeres microfissures que es produeixin, col·loquem la galga al centre del panell orientada perpendicularment als eixos de recolzament.



Figura 22. Disposició galga extensomètrica

Per la col·locació del transductor de moviment també utilitzarem de base el model obtingut amb l'ANSYS on veiem que la zona on obtenim més desplaçament i per tant la que ens interessa obtenir dades és la part central de la placa.

Com que haurem d'aplicar una pressió a tota la part superior, la galga l'haurem de col·locar en un extrem del panell. El punt ideal seria just el centre de la placa, ja que serà el punt amb més deformació perquè tot i que l'objectiu és aplicar una càrrega totalment distribuïda al llarg de la superfície, sabem que al centre és molt probable que sempre hi hagi una mica més de càrrega i per tant també deformació.

Col·locar el transductor al centre ens ha sigut impossible. Per la part superior perquè en aquell punt hi ha carrega aplicada i no hi ha espai per el transductor i per la part inferior hi ha el risc que si el panell es trenca ens pugui fer malbé l'equip.

En la figura 23 veiem una foto de la col·locació final de transductor de desplaçament.



Figura 23. Col·locació transductor de moviment

4.4.3 Càrrega aplicada i condicions de contorn

4.4.3.1 Càrrega aplicada

Amb els objectius que hem marcat a estudiar en aquests assaigs és molt important que la càrrega aplicada sigui el màxim de distribuïda a tota a superfície de panell, ja que la pressió a representar és l'acció del vent, que actua amb la mateixa magnitud en tota la cara de la placa.

Per això, i a falta d'equips adaptats per aplicar aquestes càrregues al laboratori, hem utilitzat un sac de sorra "Big-Bag" el qual té unes dimensions de 1000x1000x1000 mm i

queda ben col·locat en tota la superfície del panell. El material utilitzat per carregar el sac ha estat sorra perquè és un material fàcil de manipular alhora d'abocar-lo dins del sac i fàcil de escampar per aconseguir la càrrega distribuïda desitjada.



Figura 24. "Big-Bag" sobre el panell, carregat amb sorra

Per tal de treure uns bons resultats i poder veure una reacció de la placa constant tan en el temps com en l'augment de càrrega, el mètode escollit a seguir és afegir 10 kg de sorra cada dos minuts. Un cop abocada la càrrega, amb la mà escamparem bé la sorra perquè el pes es reparteixi i la càrrega sigui homogènia.

Amb l'ajuda d'un recipient i una bàscula calcularem la quantitat de sorra aplicada en cada càrrega.



Figura 25. Instruments utilitzats per la càrrega de pes sobre la placa

4.4.3.2 Condicions de contorn

Les condicions de contorn utilitzades són les que en un futur es preveu que s'utilitzaran en el muntatge d'aquest panells, recolzats en dues arestes oposades, deixant 3 cm de recolzament a banda i banda i la part central lliure. Per fer-ho hem utilitzat dues taules del laboratori separades a la distància exacta (94 cm).



Figura 26. Recolzament del panell per el seu estudi

Perquè tota la deformació provocada per el pes de la sorra es transformés en deformació al panell i no passes a la fusta de la taula, hem falcat aquesta amb llistons de fusta per la part inferior. Així aconseguim millorar les dades obtingudes amb els instruments de mesura i que aquestes siguin les que desitgem.



Figura 27. Suports per reforçar la taula i evitar deformacions paral·leles a les del panell

5 ASSAIGS PANELLS DE FAÇANA

Tal com ja hem comentat, l'assaig que durem a terme es tracta d'aplicar una carrega distribuïda a tota la superfície del panell igual a la que hem trobat en els càlculs d'acció del vent. Aplicarem la càrrega progressivament per tal de poder observar quina és el comportament del panell a mesura que aquesta s'amplia.

En el capítol anterior hem especificat quines condicions de contorn utilitzarem i el mètode de carrega de pes per dur a terme l'assaig.

Tal com hem definit en el capítol 4, dividirem el treball experimental en dos estudis, un primer amb el panell sol i un segon afegint una placa de poliestirè extruït.

5.1 Assaig 1. Placa de formigó UHPFRC

En el primer assaig estudiarem com treballa la placa de formigó reforçada amb fibres tota sola. Ens interessa valorar si pot aguantar la carrega a la qual estaria exposat treballant en l'edifici estudiat i també quin és el seu comportament a mesura que la càrrega va creixent fins arribar al seu límit elàstic. Un cop arribats a aquest punt valorarem si continuar afegint càrrega i arribar al trencament.

Un cop seguits els passos de col·locació dels instruments de mesura i tenim la placa al seu lloc amb les condicions de contorn desitjades procedirem a aplicar la càrrega. Com ja hem comentat, per obtenir uns resultats constants en el temps, la metodologia utilitzada és carregar 10 kg de sorra cada 2 minuts.

5.1.1 Resultats obtinguts

Amb l'objectiu de comprovar si el panell de formigó és prou resistent per suportar les accions del vent calculades, la primera fita és aplicar la pressió calculada de 1,47 KN/m². Si transformem aquesta pressió a kg per metre quadrat que necessitem carregar en l'assaig, trobem el següent:

$$\frac{1,47 \text{ KN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1000 \text{ N}}{1 \text{ KN}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{9,8 \text{ N}} \cdot 1 \text{ m}^2 = 150 \text{ kg}$$

Per tant el primer objectiu és fer 15 càrregues de 10 kg i observar com ha reaccionat el panell. Tot seguit seguirem aplicant càrrega fins el seu trencament.



Figura 28. Imatge durant un moment del primer assaig

Un cop arribat als 150 kg de càrrega s'ha vist que la placa encara treballava sense patir en cap punt. Per tant hem seguit fins a arribar al punt de trencament.

Fins que el formigó no ha començat a fallar hem pogut carregar fins a 240 kg. En aquest punt les tensions ja no es mantien constants i en aproximàvem al límit a tracció.

L'evolució de tot l'assaig la podem veure en la gràfica obtinguda al llarg del procés sense eliminar cap dada, representada en la figura 29.

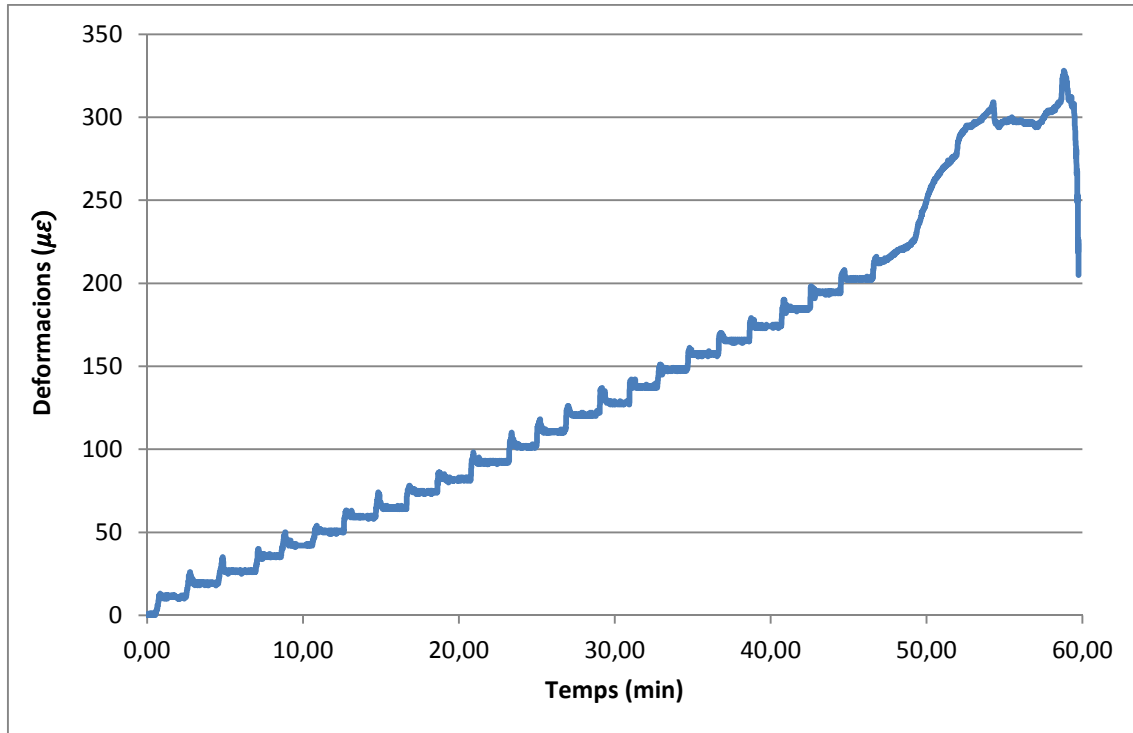


Figura 29. Representació deformació-temps al llarg de l'assaig sense eliminar dades

En la gràfica anterior podem veure l'evolució de les deformacions mesurades per la galga extensomètrica al llarg de tot l'assaig. Podem comentar varis temes referents a la gràfica anterior:

- Com podem observar el comportament durant l'etapa elàstica és totalment lineal i constant. A mesura que avança l'assaig i afegim carrega les dades de deformació formen una línia recta.
- Dins la línia recta podem apreciar que cada dos minuts ens apareix un pic. Cada un d'aquests pics representa el moment en que hem afegit càrrega a la placa i hem repartit la sorra amb les mans perquè quedi ben distribuïda. Abocar i escampar la sorra aproximadament ens ocupa uns 30 segons. El següent minut i mig ens serveix perquè el panell s'estabilitzi i ens doni les dades reals de deformació.

Per avaluar les propietats de la placa de formigó només utilitzarem les dades obtingudes un cop aquest s'ha estabilitzat. Els pics provocats per factors externs els eliminarem.

- El comportament del panell és completament constant fins a un valor de càrrega de 240 kg. En aquest punt que es veu que les tensions no s'estabilitzaven deixem d'afegir càrrega, per tant és aproximadament al minut 46 que afegim l'últim recipient de sorra.
- Per avaluar millor el comportament en el punt de trencament representarem en un gràfic només aquesta zona:

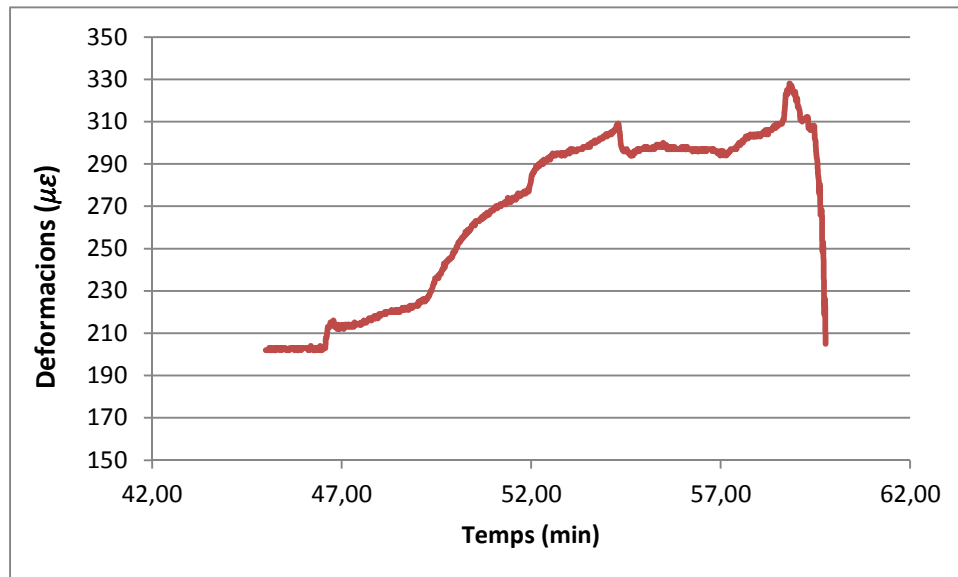


Figura 30. Deformació-temps en el moment del trencament

- A l'inici de la corba veiem l'últim pic per la càrrega de 10 kg (aproximadament minut 46) i tot seguit la corba ja no s'estabilitza com havia passat en els cicles anteriors. La corba es ascendent al llarg del temps fins les 310 µε que aquesta arriba a un pic. Tot seguit disminueix bruscament i es torna a estabilitzar a unes 300 µε. Passat uns minuts, la gràfica deixa de ser estable i torna a ascendir. Podem comparar el comportament obtingut amb la resposta mecànica ideal del UHPFRC a una tracció uniaxial, figura 31. És interessant veure que un cop superada l'etapa elàstica, la placa havia entrat en l'etapa de multi fissuracions.

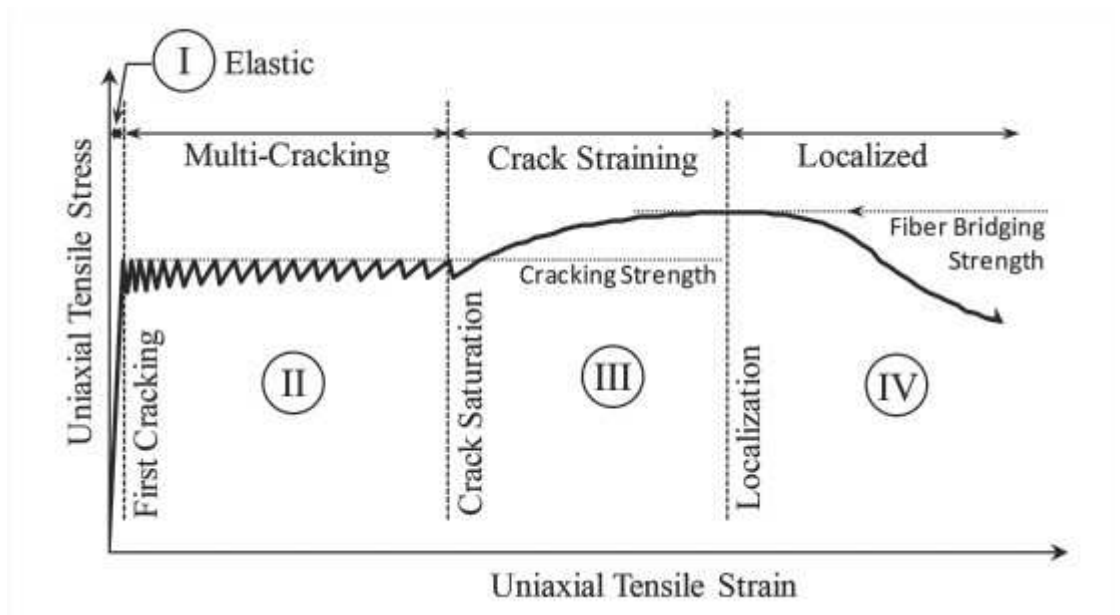


Figura 31. Resposta mecànica ideal del UHPFRC a una tracció uniaxial

Aquest comportament s'entén per el treball que fan les fibres que componen el formigó. Un cop el formigó no pot aguantar les tensions a tracció apareixen microfissures i totes les carregues es concentren en les fibres interiors. Les fibres no trenquen totes de cop, si no que la força es concentra en una zona puntual on el formigó deixa de treballar perquè s'ha superat la seva resistència a tracció. Un cop les fibres d'aquesta zona també trenquen (primer pic que arriba a $310 \mu\epsilon$) passen a actuar un altre grup de fibres i per tant aconseguim una recuperació momentània. És molt usual que el trencament no es produeixi sempre per la zona més sol·licitada degut a que la distribució de fibres normalment no és completament homogènia.

En la gràfica del nostre assaig veiem que tot seguit el trencament és immediat. Això no hauria de ser així ja que igual com ha passat en el primer trencament de fibres, hauríem d'obtenir un seguit de cicles semblant.

En aquest punt de l'assaig i havent obtingut unes dades molt interessants es volia veure si aturant l'assaig i retirant la placa ens era possible veure les primeres fissures i on s'havien produït. Al treure la càrrega amb una ploma vam fer que aquesta deixés de

ser distribuïda en tota la superfície, la vam concentrar en una zona i la placa va trencar.
Així s'explica el segon pic tan sobtat i la baixada tan brusca.



Figura 32. Intent de treure el sac per observar les primeres microfissures

Tot i que el trencament de la placa no ha estat en les condicions ideals, com que les primeres fissures que si que s'han produït amb una carrega distribuïda i constant, el trencament s'ha fet tal i com esperàvem.



Figura 33. Trencament placa primer assaig

En la figura 33 veiem que el trencament s'ha produït formant una recta completament paral·lela a les dues arestes de recolzament. La segona zona de ruptura és produïda per la manipulació del sac de sorra quan la placa ja estava al límit. El panell no ha trencat per la part central com era d'esperar, com hem comentat, una possible explicació és la distribució no homogènia de les fibres.

Si ens fixem en la zona on hi ha hagut la ruptura i fem una foto del detall veiem que totes les fibres han quedat orientades paral·lelament al trencament, això ens demostra el treball que han fet abans de trencar.



Figura 34. Detall fibres en la zona de ruptura

Per estudiar bé el comportament de la placa de formigó en l'etapa elàstica, fins el punt que comença a trencar i la placa falla, eliminem les dades que no ens interessin i ens quedem únicament amb aquelles reals, quan el panell s'estabilitza després d'aplicar i repartir la carrega.

Les dades obtingudes es recullen en la següent taula:

Carrega (kg)	Desplaçament vertical (mm)	Strain ($\mu\epsilon$)
0	0,016	0
10	0,2643	12
20	0,4506	19
30	0,6418	26
40	0,9312	36
50	1,0404	42
60	1,1785	51
70	1,3708	59
80	1,517	65
90	1,7473	74
100	1,9105	82
110	2,34	93
120	2,5463	103
130	2,7396	111
140	2,9488	121
150	3,1691	128
160	3,3333	138
170	3,4425	148
180	3,6367	157
190	3,7879	165
200	3,9862	174
210	4,2335	184
220	4,4518	195
230	4,5699	203
240	4,7001	214
240	4,7422	229
240	4,8002	271
240	4,8493	297

Taula 7. Dades obtingudes primer assaig

En la figura 35 trobem representat gràficament l'evolució del desplaçament vertical a mesura que ampliem la càrrega.

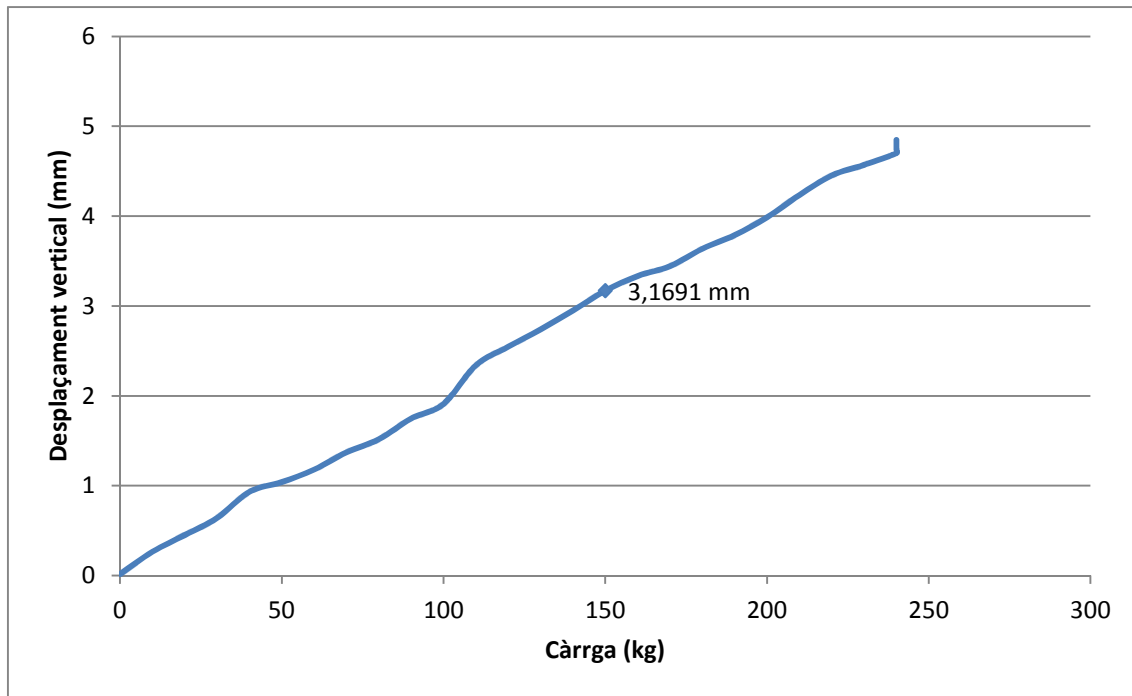


Figura 35. Representació desplaçament vertical respecte l'augment de càrrega

Veiem que la gràfica evoluciona constant fins els 240 kg. En el punt que el desplaçament augmenta sobtadament és quan les tensions calculades amb la galga també deixaven d'estabilitzar-se passat un petit període de temps.

Hem marcat el punt on la càrrega és igual a 150 kg per tenir el valor exacte del desplaçament obtingut. Aquest punt és on trobem la càrrega que haurà de suportar el panell degut a les accions del vent.

5.1.2 Càlcul mòdul de Young

Amb els valors obtinguts en l'assaig podem calcular el mòdul de Young exacte del material i així ajustar els models de ANSYS per tal d'obtenir dades més reals.

Per fer aquest càlcul necessitarem fer la gràfica tensió-deformació de l'etapa de comportament elàstic del material. Les dades d'aquesta etapa les tenim recollides en la taula anterior i per fer la gràfica només ens caldrà trobar els valors de la tensió en el punt on hem instal·lat la galga.

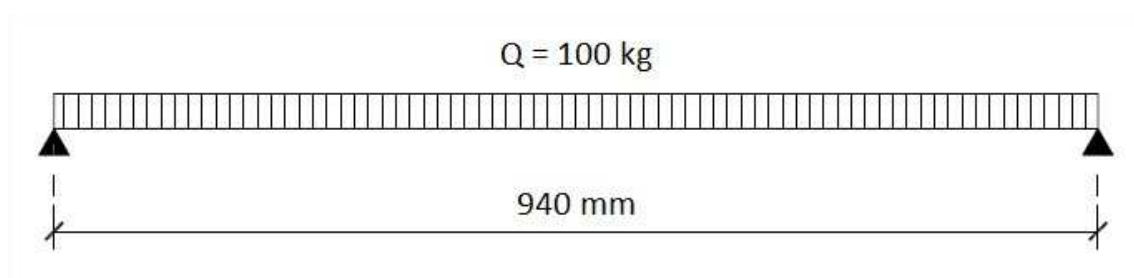
A continuació calcularem la tensió en un punt a partir dels resultats obtinguts i també podrem trobar el mòdul de Young. Seguidament mitjançant l'Excel podrem trobar les tensions de cada un dels punts estudiats i fer una regressió lineal per trobar quin és el valor real del mòdul.

Estudiarem el següent punt:

Càrrega (kg)	Deformació ($\mu\epsilon$)
100	82

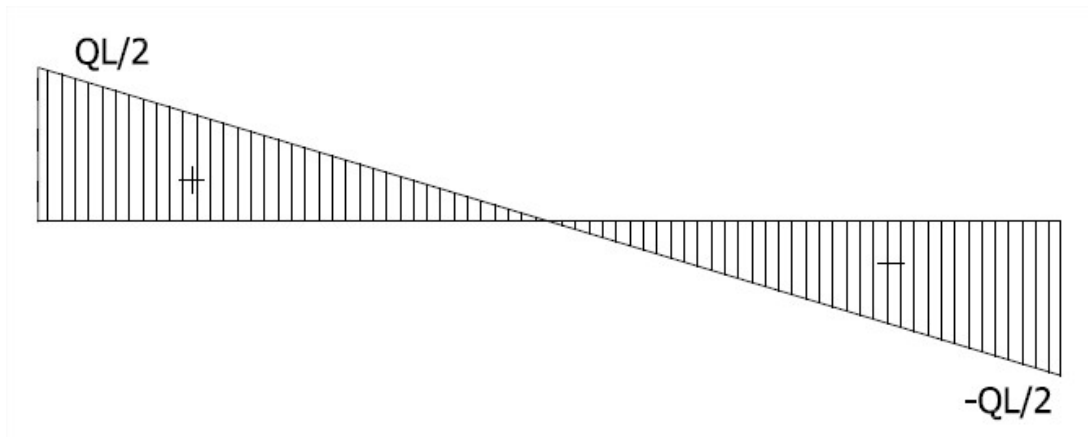
En el nostre assaig ens trobem en la següent situació:

- Càrrega aplicada:



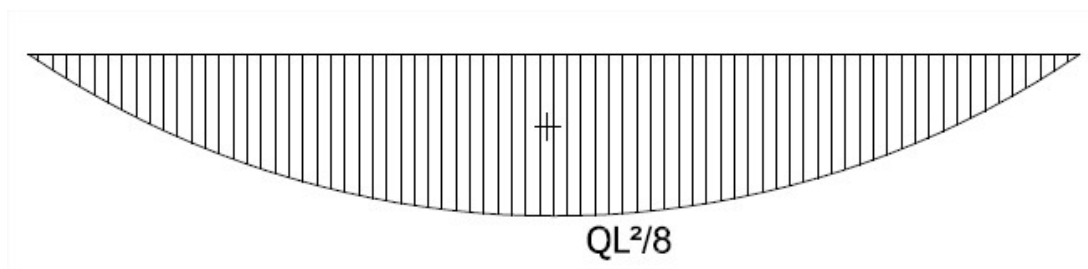
$$q = 100 \frac{kg}{m} = 980 \frac{N}{m} = 0,98 \frac{N}{mm}$$

- Diagrama de tallants:



$$\frac{q \cdot L}{2} = \frac{0,98 \cdot 940}{2} = 460,6 \text{ N}$$

- Diagrama de moments:



Calculem el moment màxim en la zona central:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{0,98 \cdot 940^2}{8} = 108241 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Amb el moment màxim trobat podem calcular la tensió amb la següent fórmula:

$$\sigma = \frac{M \cdot y_{max}}{I_z}$$

On la y_{max} és la distància e l'eix neutre de la secció amb la fibra més allunyada d'aquesta. En el nostre cas, com que hem considerat que la secció es de 1,4 mm, el valor de y_{max} és:

$$y_{max} = 0,7 \text{ mm}$$

I_z és el moment d'inèrcia de la secció. Al ser una secció rectangular el calcularem de la següent forma:

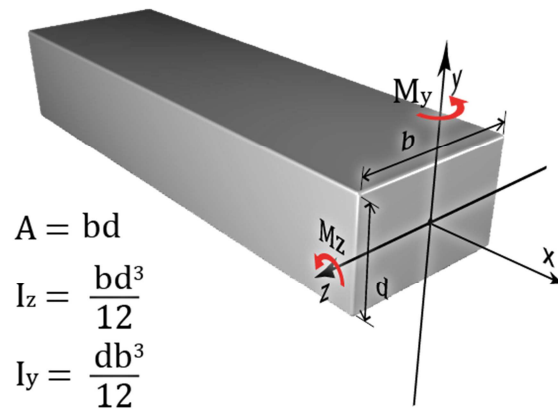


Figura 36. Moments inèrcia secció rectangular

$$I_z = \frac{b \cdot d^3}{12} = \frac{1000 \cdot 14^3}{12} = 228666,66 \text{ mm}^4$$

Per tant, amb els valors anteriors, trobem la tensió en aquest punt:

$$\sigma_{(100 \text{ kg})} = \frac{M \cdot y_{max}}{I_z} = \frac{108241 \text{ Nmm} \cdot 7 \text{ mm}}{228666,66 \text{ mm}^4} = 3,31 \text{ N/mm}^2$$

Amb en valor de la tensió calculat i la deformació que ens ha mesurat la galga podem trobar el mòdul de Young:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{3,31}{82 \cdot 10^{-6}} = 40408,8 \text{ MPa}$$

Amb les dades d'un sol punt ja podem tenir el valor del mòdul de Young, però per tenir un valor més exacte, apliquem totes les fórmules anteriors en un Excel i representem la gràfica tensió-deformació.

En la taula 8 recollim els resultats obtinguts amb Excel.

Inèrcia secció	228666,66 mm ⁴
y_{max}	7 mm
Longitud	940 mm
L₂	883600 mm ²

Carrega [kg]	Carrega [N/mm ²]	Moment [Nmm]	Tensió [N/mm ²]	Strain [μ ϵ]	Strain [ϵ]
0	0	0	0	0	0
10	0,098	10824,1	0,33135001	12	0,000012
20	0,196	21648,2	0,662700019	19	0,000019
30	0,294	32472,3	0,994050029	26	0,000026
40	0,392	43296,4	1,325400039	36	0,000036
50	0,49	54120,5	1,656750048	42	0,000042
60	0,588	64944,6	1,988100058	51	0,000051
70	0,686	75768,7	2,319450068	59	0,000059
80	0,784	86592,8	2,650800077	65	0,000065
90	0,882	97416,9	2,982150087	74	0,000074
100	0,98	108241	3,313500097	82	0,000082
110	1,078	119065,1	3,644850106	93	0,000093
120	1,176	129889,2	3,976200116	103	0,000103
130	1,274	140713,3	4,307550126	111	0,000111
140	1,372	151537,4	4,638900135	121	0,000121
150	1,47	162361,5	4,970250145	128	0,000128
160	1,568	173185,6	5,301600155	138	0,000138
170	1,666	184009,7	5,632950164	148	0,000148
180	1,764	194833,8	5,964300174	157	0,000157
190	1,862	205657,9	6,295650184	165	0,000165
200	1,96	216482	6,627000193	174	0,000174
210	2,058	227306,1	6,958350203	184	0,000184
220	2,156	238130,2	7,289700213	195	0,000195
230	2,254	248954,3	7,621050222	203	0,000203
240	2,352	259778,4	7,952400232	214	0,000214
240	2,352	259778,4	7,952400232	229	0,000229
240	2,352	259778,4	7,952400232	271	0,000271
240	2,352	259778,4	7,952400232	297	0,000297

Taula 8. Resultats obtinguts amb Excel

Representem els resultats en una gràfica i realitzem una regressió lineal. Com que la fórmula que relaciona la tensió amb la deformació és: $\sigma = E \cdot \epsilon$, el pendent de la regressió ens donarà el mòdul de Young.

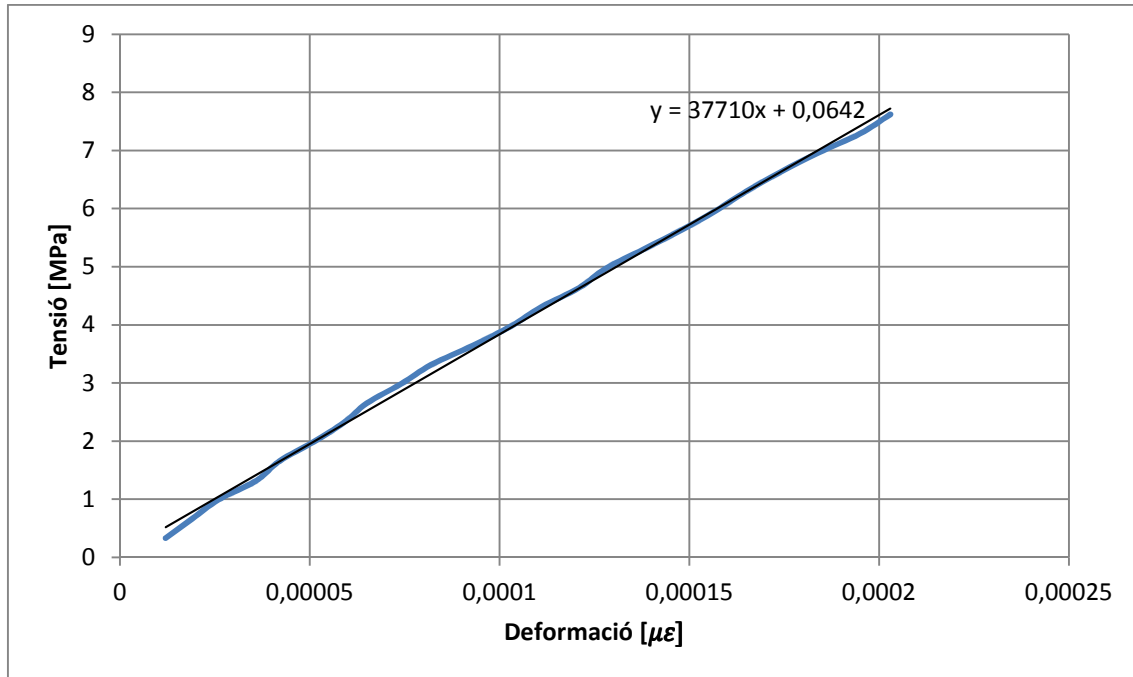


Figura 37. Tensió-deformació obtinguda amb Excel

Amb la regressió lineal veiem que el mòdul de Young amb tots els valors mesurats és aproximadament 37,7 GPa. És el valor que utilitzarem quan representem l'assaig en el programa ANSYS.

5.2 Assaig 2: Placa UHPFRC unit a una placa aïllant de poliestirè extruït

En el segon estudi unirem al panell de formigó una placa de poliestirè extruït que treballarà com aïllant, amb l'objectiu de comprovar si aquest influeix en el comportament estructural del panell.

Com hem comentat en la presentació dels materials, els dos panells que disposem són de diferent gruix i això farà que la comparació entre els resultats obtinguts en un assaig i en l'altre sigui complicat. Per tant, perquè la contribució de la placa de poliestirè pugui ser més observable hem agafat el panell de menor gruix per fer aquest estudi.

Com en el primer estudi, ens interessarà comprovar que el panell pot aguantar l'acció del vent i avaluar el seu comportament a mesura que augmentem la carrega aplicada. Les condicions de contorn utilitzades i el mètode seguit serà idèntic al del primer assaig.

En l'annex F es descriuen els passos extres que s'han dut a terme per la preparació d'aquest assaig. La distribució de la instrumentació ha sigut idèntica al primer però abans s'ha fet la unió entre el panell i la placa aïllant.



Figura 38. Presentació segon assaig

Respecte el primer assaig només farem una modificació. Com que en el primer hem vist que parar l'assaig per tal de buscar on i com s'han general les primeres

microfissures és molt difícil, degut al pes del sac de sorra, en aquest segon decidim que deixarem treballar la placa fins que trenqui, trobant així el desplaçament vertical màxim i el comportament durant la deformació fins la ruptura.

Perquè evitar que un cop la placa arribi el punt de ruptura no caigui tot l'assaig a terra i correm el risc de que la placa trenqui per més llocs a part de la ruptura generada per la càrrega aplicada i no poder estudiar per on i com ha trencat, col·locarem un transpalet a la part inferior per sostenir-la.



Figura 39. Transpalet utilitzat en el segon assaig

El mètode seguit per carregar la placa ha estat idèntic al del que en el primer assaig.

5.2.1 Resultats obtinguts

El primer punt a destacar del resultat obtingut en l'assaig és que la placa de poliestirè no ha treballat com desitjàvem. Hem arribat a aquesta conclusió un cop hem vist l'estat en el que ha quedat la placa i l'adhesiu que havíem aplicat. En la figura 40 podem veure que les fibres de la cola han quedat corregudes, això indica que el treball no ha estat el correcte i que la unió no ha sigut la ideal.



Figura 40. Estat de l'adhesiu un cop realitzat l'assaig

Perquè la placa hagués treballat correctament, en tot moment l'aïllant hauria d'haver estat completament adherit al panell i els esforços generats en la direcció normal d'aquest.

Per tant, en els càlculs considerarem que el panell de UHPFRC ha treballat en solitari sense la placa aïllant, com en el primer assaig. Si la placa de poliestirè té alguna contribució estructural ho comprovarem mitjançant el model amb el programa d'elements finits ANSYS.

Un cop hem valorat el punt de la placa aïllant, en la gràfica següent llistem totes les dades recollides per la galga extensomètrica al llarg de l'assaig.

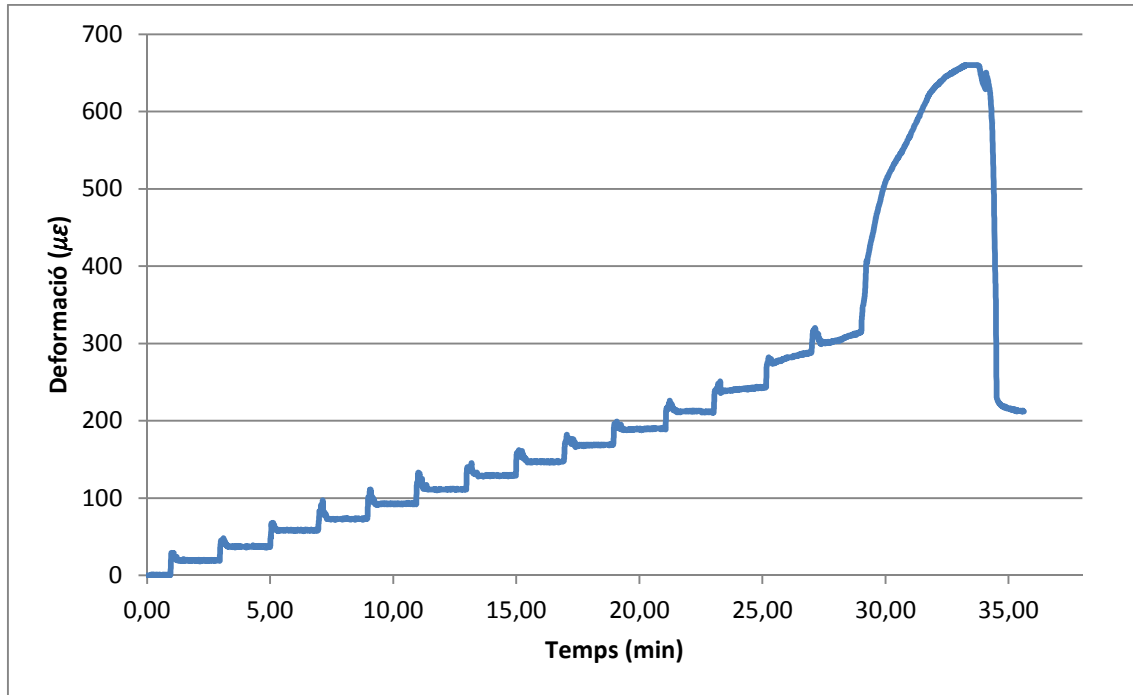


Figura 41. Gràfica deformació- temps del segon assaig

Com podem veure, a diferència del primer assaig, en aquest hem deixat que el panell seguís tot el procés fins al trencament total. De la gràfica anterior podem comentar varis punts interessants:

- El comportament durant l'etapa elàstica és lineal i constant.
- Al repetir exactament el mateix mètode utilitzat en el primer assaig, podem veure que altre cop trobem un pic de deformació a cada càrrega que fem. És degut al primer impacte que rep el panell al abocar la sorra i l'acció d'escampar-la. Per els càlculs necessaris només prendrem com a valors vàlids quan la gràfica s'estabilitza.
- Veiem que en el 12è pic, per tant quan la càrrega total és de 120 kg, la corba ja no s'estabilitza en els moments posteriors a aplicar-la. El pendent positiu és molt petit però es comença a veure que el panell està patint i que ens acostem al límit. És al carregar els 150 kg quan la deformació es dispara fins al seu trencament.
- Si recuperem la figura 31 de l'apartat 5.1, on mostràvem la resposta mecànica ideal del UHPFRC a tracció uniaxial, destacàvem el cicle de multifissuració. En el

segon assaig no hem passat per aquesta etapa ja que amb els 150 kg hem arribat a la tensió límit de la placa i aquesta ha trencat de seguida.

Hem pogut calcular també el desplaçament màxim obtingut i així comprovar la ductilitat del material. En la figura 42 podem veure gràficament l'evolució del valor del desplaçament al llarg de l'assaig en mil·límetres.

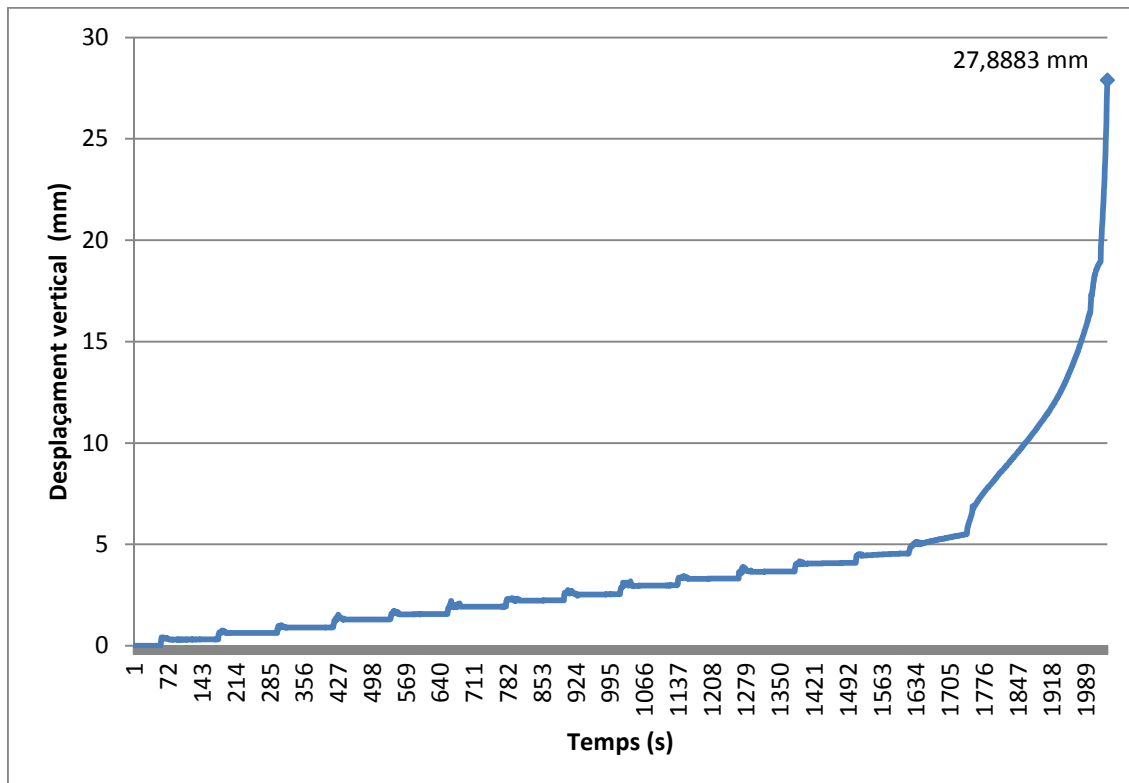


Figura 42. Gràfica de l'evolució del desplaçament vertical durant el segon assaig

Veiem que el valor màxim, just abans de la ruptura, és de 27,88 mm. Això ens demostra l'alta ductilitat d'aquest material.

En aquest segon assaig veiem que la corba de deformació es dispara justament quan fem la càrrega dels 150 kg, que és el valor d'estudi. Per tant en aquest cas, el panell assajat no és adequat per les sol·licitacions que demanem que ens aguanti.

En la figura 43 podem veure una imatge de el trencament del panell en el segon assaig. Igual que en el primer no ha trencat exactament per el centre, però si que ho ha fet traçant una línia recta i perpendicular als eixos de suport.



Figura 43. Trencament panell segon assaig

Si ens fixem en detall en com han quedat les fibres en la zona de trencament, veiem que totes treballen en direcció a l'eix principal de tensions i fins i tot algunes encara estan unides.



Figura 44. Detall fibres en la zona de trencament del segon assaig

5.2.2 Càlcul mòdul de Young

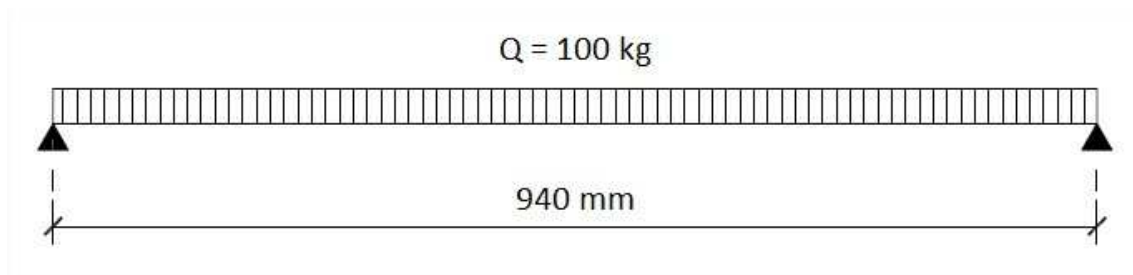
Igual com hem fet en el primer assaig, amb els valors obtinguts podem calcular el mòdul de Young i així podrem ajustar els models fets en l'ANSYS i també comparar-lo amb l'obtingut en el primer assaig.

Repetim el procés de càlcul. Estudiarem el mateix punt, amb 100 kg de càrrega:

Càrrega (kg)	Deformació ($\mu\epsilon$)
100	189

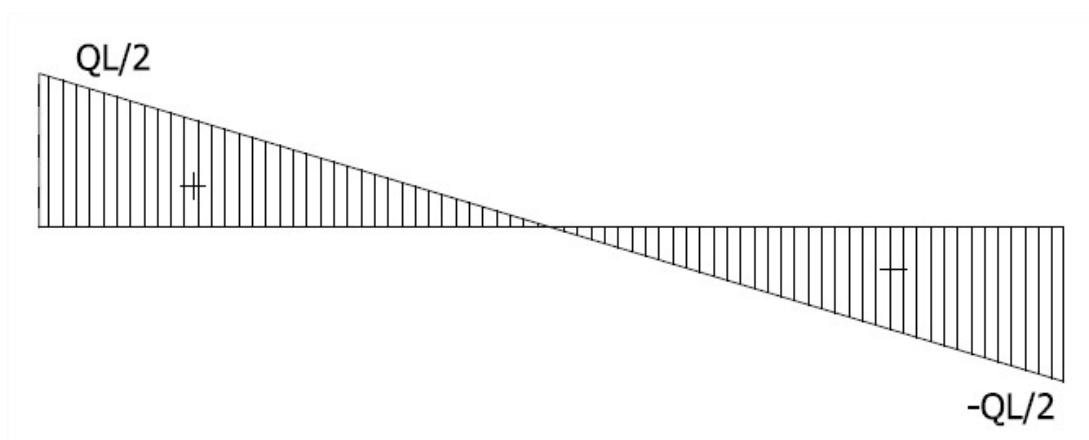
Ens trobem en el cas idèntic que el primer assaig.

- Càrrega aplicada:



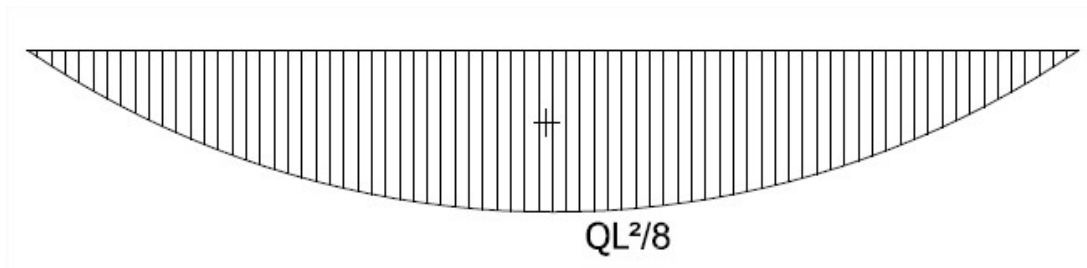
$$q = 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 980 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 0,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

- Diagrama de tallants:



$$\frac{q \cdot L}{2} = \frac{0,98 \cdot 940}{2} = 460,6 \text{ N}$$

- Diagrama de moments:



Calculem el moment màxim en la part central:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{0,98 \cdot 940^2}{8} = 108241 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Amb el moment màxim trobat podem calcular la tensió amb la següent fórmula:

$$\sigma = \frac{M \cdot y_{max}}{I_z}$$

On:

$$y_{max} = 4,5 \text{ mm}$$

$$I_z = \frac{b \cdot d^3}{12} = \frac{1000 \cdot 9^3}{12} = 60750 \text{ mm}^4$$

Per tant, amb els valors anteriors, trobem la tensió en aquest punt:

$$\sigma_{(100 \text{ kg})} = \frac{M \cdot y_{max}}{I_z} = \frac{108241 \text{ Nmm} \cdot 4,5 \text{ mm}}{60750 \text{ mm}^4} = 8,01 \text{ N/mm}^2$$

Amb en valor de la tensió calculat i la deformació que ens ha mesurat la galga podem trobar el mòdul de Young:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{8,01}{198 \cdot 10^{-6}} = 42422,49 \text{ MPa}$$

Repetim el procediment mitjançant el programa Excel per tots els punts trobats en l'assaig i representem la corba tensió-deformació.

En la taula 9 recollim els resultats obtinguts amb Excel en el segon assaig.

Inèrcia secció	60750 mm ⁴
y_{max}	4,5 mm
Longitud	940 mm
L²	883600 mm ²

Càrrega [kg]	Carrega [N/mm]	Moment [Nmm]	Tensió [N/mm ²]	Strain [$\mu\epsilon$]	Strain [ϵ]
0	0	0	0	0	0
10	0,098	10824,1	0,801785185	19	0,000019
20	0,196	21648,2	1,60357037	37	0,000037
30	0,294	32472,3	2,405355556	59	0,000059
40	0,392	43296,4	3,207140741	72	0,000072
50	0,49	54120,5	4,008925926	93	0,000093
60	0,588	64944,6	4,810711111	111	0,000111
70	0,686	75768,7	5,612496296	129	0,000129
80	0,784	86592,8	6,414281481	147	0,000147
90	0,882	97416,9	7,216066667	169	0,000169
100	0,98	108241	8,017851852	189	0,000189
110	1,078	119065,1	8,819637037	212	0,000212
120	1,176	129889,2	9,621422222	239	0,000239
130	1,274	140713,3	10,42320741	277	0,000277
140	1,372	151537,4	11,22499259	302	0,000302
150	1,47	162361,5	12,02677778	315	0,000315

Taula 9. Resultats obtinguts amb Excel (segon assaig)

Representem els valors obtinguts en la gràfica tensió-deformació. El pendent de la gràfica ens donarà el valor de mòdul de Young.

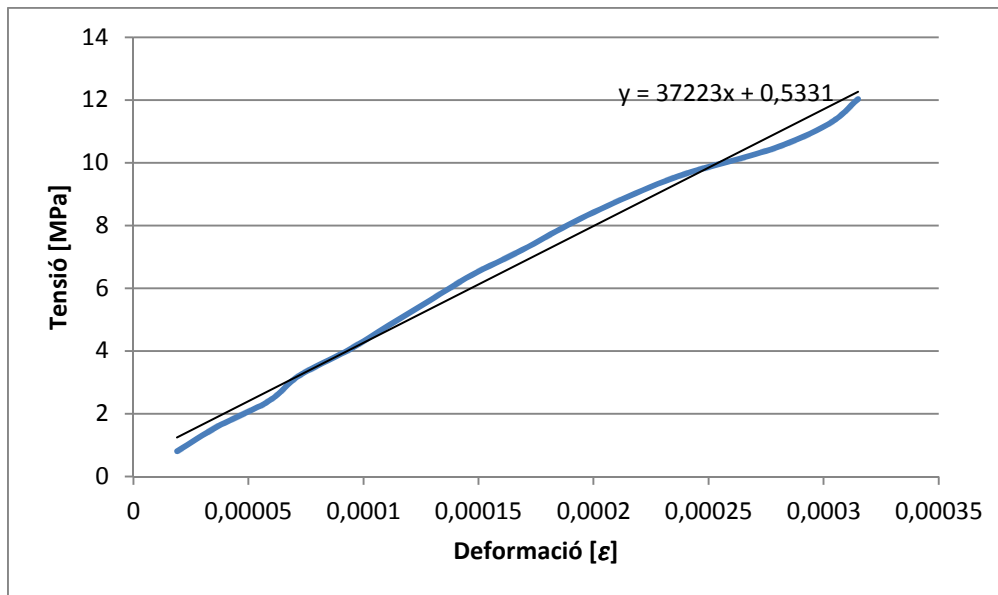


Figura 45. Gràfica tensió-deformació del segon assaig

Si comparem amb l'obtingut en el primer assaig, veiem que el mòdul de Young és pràcticament el mateix. En aquest cas 37,22 GPa. El material utilitzat per fabricar els dos panells és el mateix, per tant es correcte que el valor coincideixi.

5.3 Comparació dels assaigs

Per tal de comparar els dos assaigs, representem en una mateixa gràfica l'evolució de les deformacions dels ambdós (figura 46). Com ja hem comentat, el fet de que siguin dos panells amb diferents gruixos no ens permetrà fer una bona comparació ja que les dades obtingudes difereixen molt.

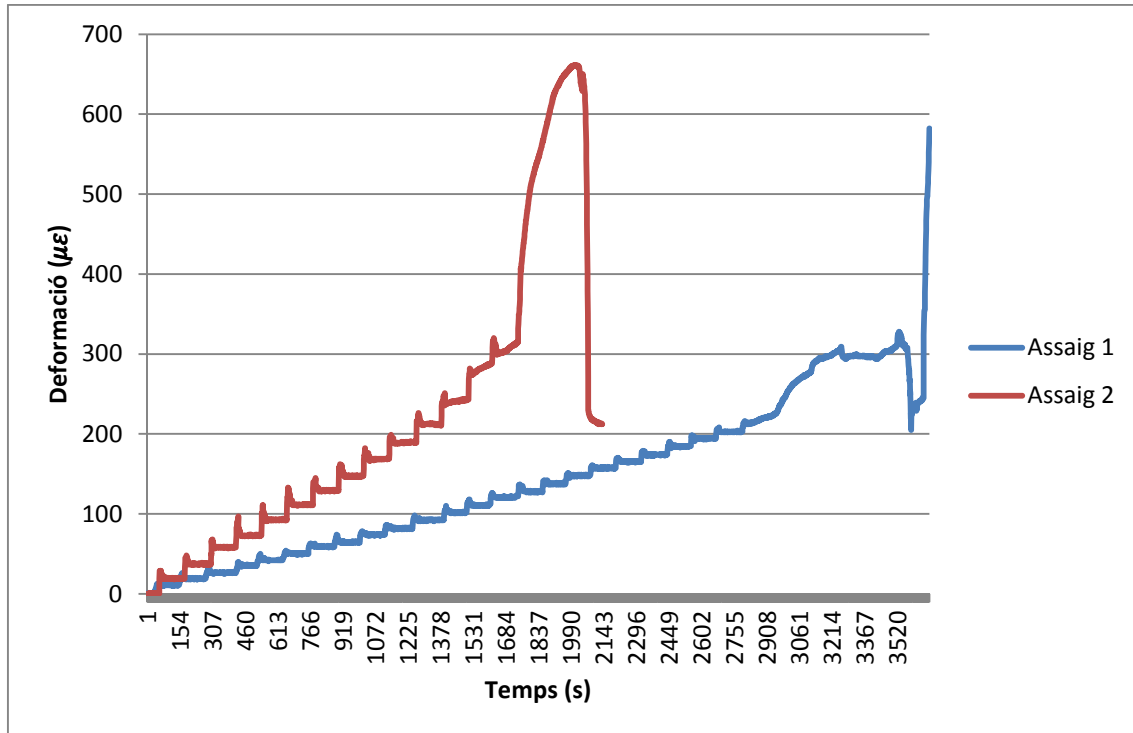


Figura 46. Gràfica comparativa de la deformació al llarg dels dos assaigs

Comparant els dos assaigs podem fer varies observacions:

- Els dos panells de formigó UHPFRC tenen una primera etapa totalment elàstica.
- Al treballar amb materials molt esvelts les petites diferències de secció, en aquest cas de uns 5 mm, són molt importants per la resistència mecànica.
- El panell del primer assaig és capaç d'aguantar les càrregues calculades i per tant pot treballar com a panell de façana en el cas estudiat. El panell del segon estudi no ha aguantat la càrrega de 150 kg.
- En l'assaig 1, la reacció del panell és ideal fins el punt que intentem trobar les primeres fissures. En el segon, al aplicar una càrrega massa elevada no hem passat per el cicle de multifissuració.
- El formigó UHPFC és un material molt dúctil, en l'assaig 2 hem trobat que abans de trencar ha arribat a una deformació vertical màxima de 27 mm. En el primer, al no deixar que treballés fins el trencament no tenim aquest valor.

6 Models amb ANSYS dels assajos

6.1 Model primer assaig

Recuperem els models que havíem preparat anteriorment als assajos i que ens han servit per avaluar quins serien els resultats aproximats i ajustem les propietats a les calculades experimentalment. D'aquesta manera podrem avaluar com reaccionaria el panell en altres condicions d'estudi.

Iniciem modelant el primer assaig. Encara que en l'assaig experimental (i també en els càlculs estructurals) el recolzament no es troba just a l'extrem de la placa, si no 3 cm desplaçat cap a l'interior, en els models de ANSYS ho hem simplificat i hem deixat les condicions de contorn igual com les havíem suposat, en les arestes que formen el perímetre.

Els canvis que fem respecte els models abans realitzats seran el gruix del panell, de 10 a 14 mm i el mòdul de Young, que experimentalment hem trobat que és de 37710 MPa. La pressió aplicada és de 1,47 MPa, que equival als 150 kg/m² que hem avaluat durant l'estudi.

Per tal de representar el màxim de real l'assaig i comprovar que les dades obtingudes al SAP coincideixen amb les obtingudes al laboratori també hem centralitzat la càrrega. Tal com hem vist en les imatges del *set-up*, tot i intentar que la càrrega fos equivalent a tota la superfície, es concentrava a la part central, per tant hem dividit el nostre panell en diverses àrees i hem aplicat la pressió al centre.

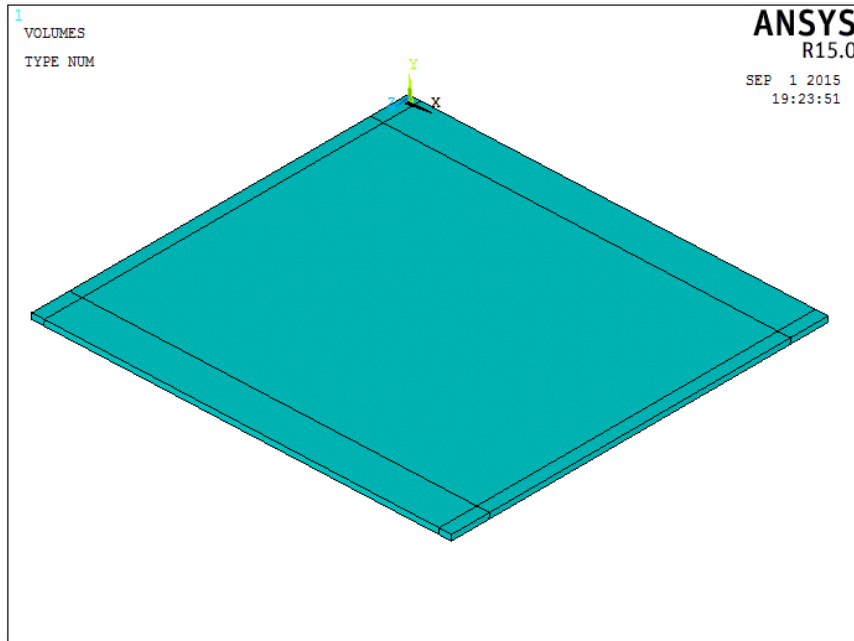


Figura 47. Divisió del panell per centrar la càrrega del model

Solucionem el model i comparem els resultats obtinguts amb els adquirits a l'assaig. Si ens fixem en la deformació del panell i de les tensions en l'eix x, trobem els següents resultats.

- o Deformació dels nodes en l'eix vertical:

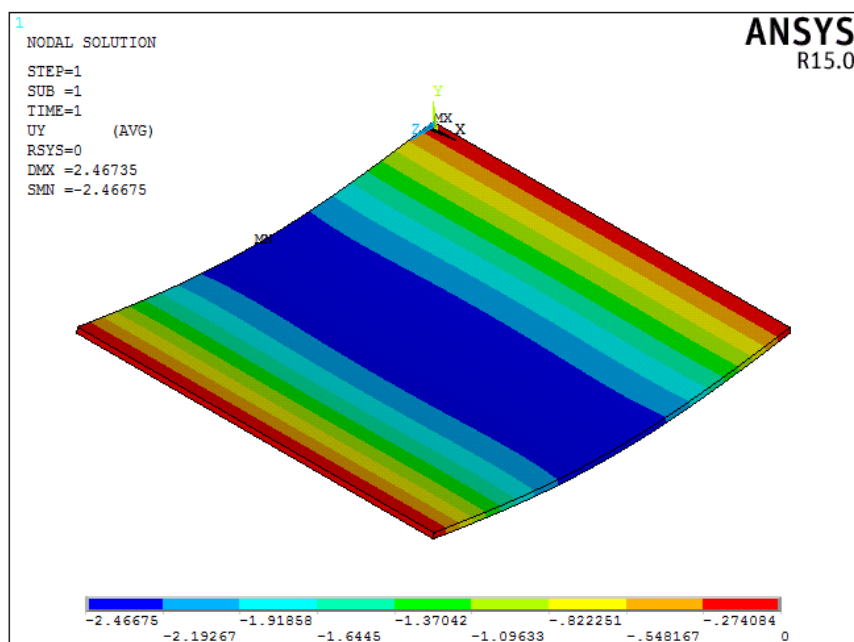


Figura 48. Desplaçament vertical model assaig 1

Veiem que el desplaçament màxim en el model amb ANSYS és de 2,46mm. En l'assaig al laboratori hem trobat que la placa es deforma fins els 3,16 mm, l'error obtingut és d'aproximadament un 20%.

Aquesta diferència pot ser deguda diferents causes:

- Les condicions de contorn aplicades al model: per tal que el programa pugui trobar solució al problema, ens obliga a que una de les dues arestes tingui tots els moviments bloquejats i l'altre només el moviment en l'eix de la y. En el l'assaig al laboratori, cap dels dos extrems es troba completament bloquejat, si no que només impediem el moviment vertical.
 - La càrrega al laboratori no és completament estàtica. Cada vegada que afegim 10 kg estem generant un pic de càrrega que pot afectar en el resultat final.
 - Càrrega no distribuïda. Tot i que amb el model hem volgut imitar la problemàtica que ens hem trobat al laboratori, és molt possible que no haguem aconseguit representar la mateixa càrrega.
- Les tensions obtingudes en l'eix principal de tensions

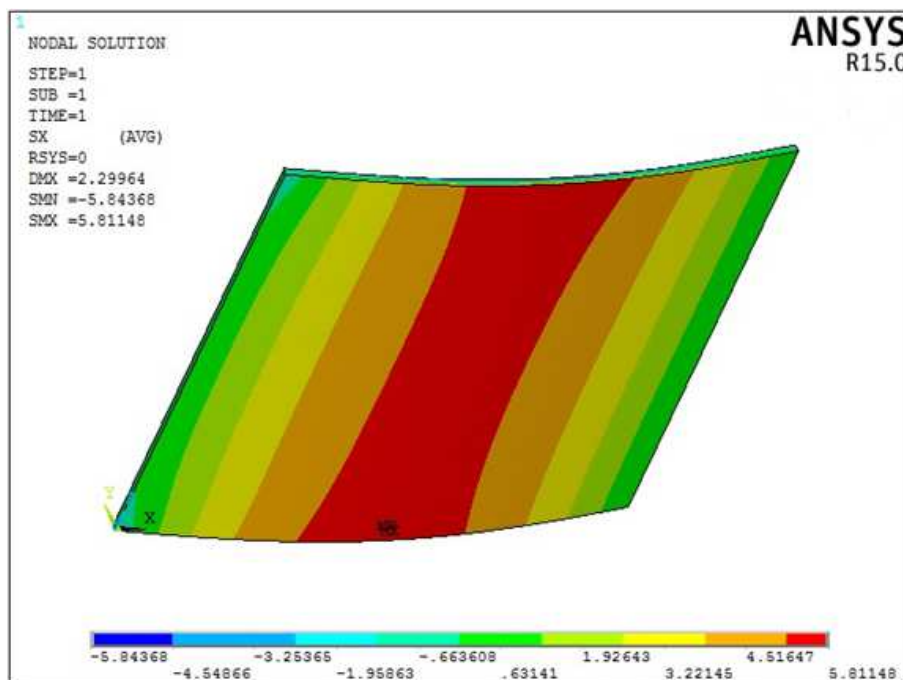


Figura 49. Tensions eix X primer assaig, condicions de contorn 1

Com veiem el valor màxim és de 5,81 KN. En els càlculs anteriors i basant-nos amb els valors de deformació obtinguts amb la galga extensomètrica hem trobat que la tensió en aquest punt de càrrega és una mica inferior, de l'ordre de 4,97 MPa. Obtenim aproximadament un 15% d'error.

Aquest error obtingut pot ser causa de:

- Si recordem la imatge de com i per on es va trencar el panell en el primer assaig, no vam aconseguir que la galga calculés els valors just en el punt de ruptura si no que està mínimament desplaçada. Mirant els resultats obtinguts mitjançant ANSYS, els 4,97 MPa es troben dins la franja vermella, que és on teníem instal·lada la galga.

En el mateix cas ens trobem quan busquem el valor de les deformacions. En el cas experimental trobem amb la galga extensomètrica el valor de $128 \mu\epsilon$, el resultat amb ANSYS el podem veure en la figura següent, on la deformació màxima és de $155 \mu\epsilon$.

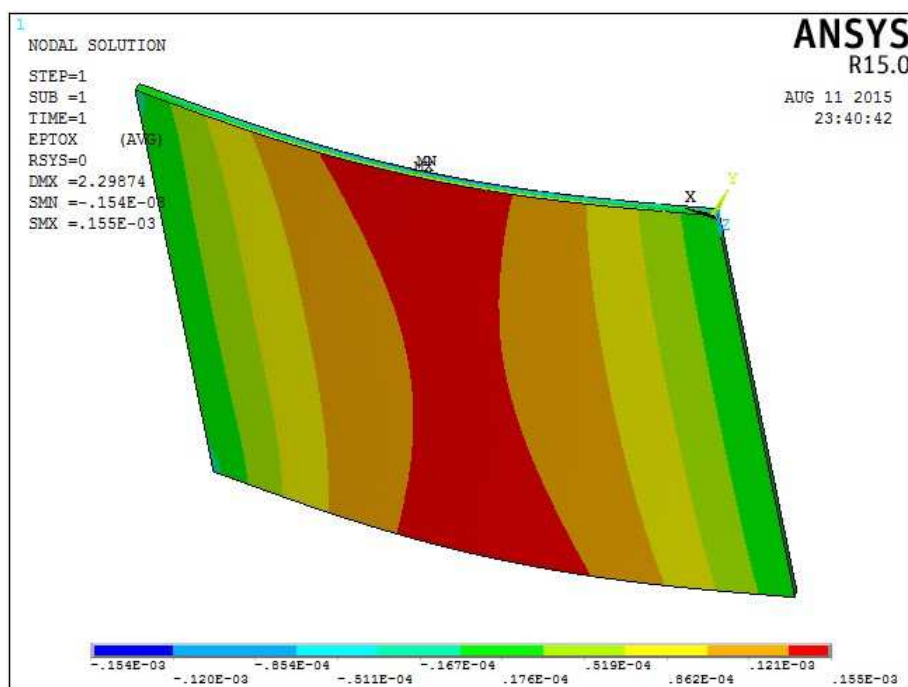


Figura 50. Deformacions eix principal tensions model assaig 1

En el cas d'aplicar la càrrega màxima, de $2,352 \text{ KN/m}^2$ que equival als 240 kg que el panell ens va permetre carregar en el primer assaig, trobem el següents resultats mitjançant el programa ANSYS:

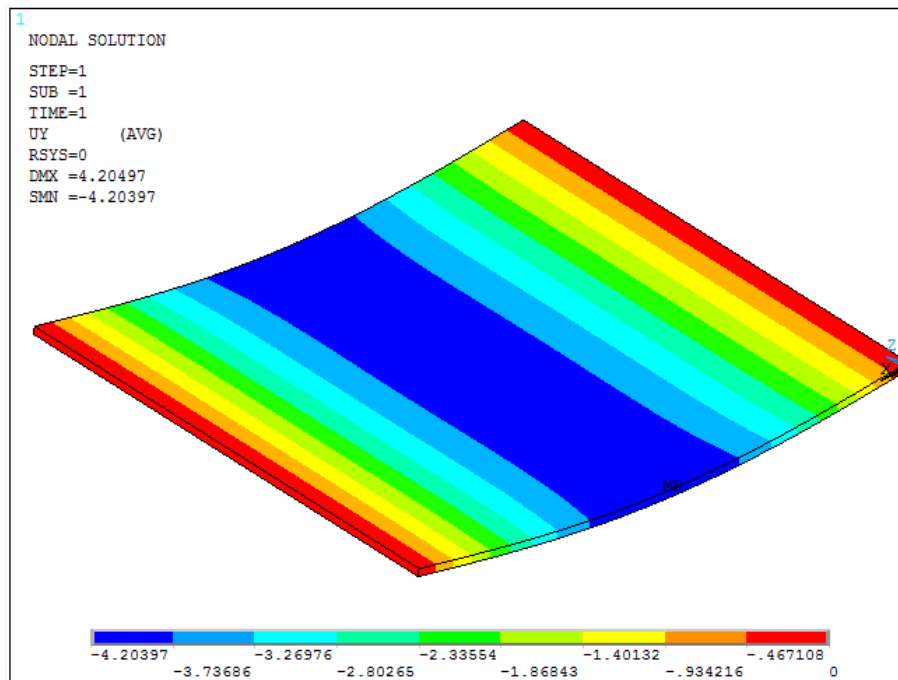


Figura 51. Desplaçament vertical model assaig 1 amb càrrega màxima

Igual com en el primer cas, el desplaçament màxim obtingut és una mica menor que la trobada experimentalment, $4,2 \text{ mm}$ contra els $4,7 \text{ mm}$ de l'assaig. En aquest cas l'error és menor, de l'ordre del 10%.

En la figura 52 representem les tensions en l'eix principal al carregar 240 kg.

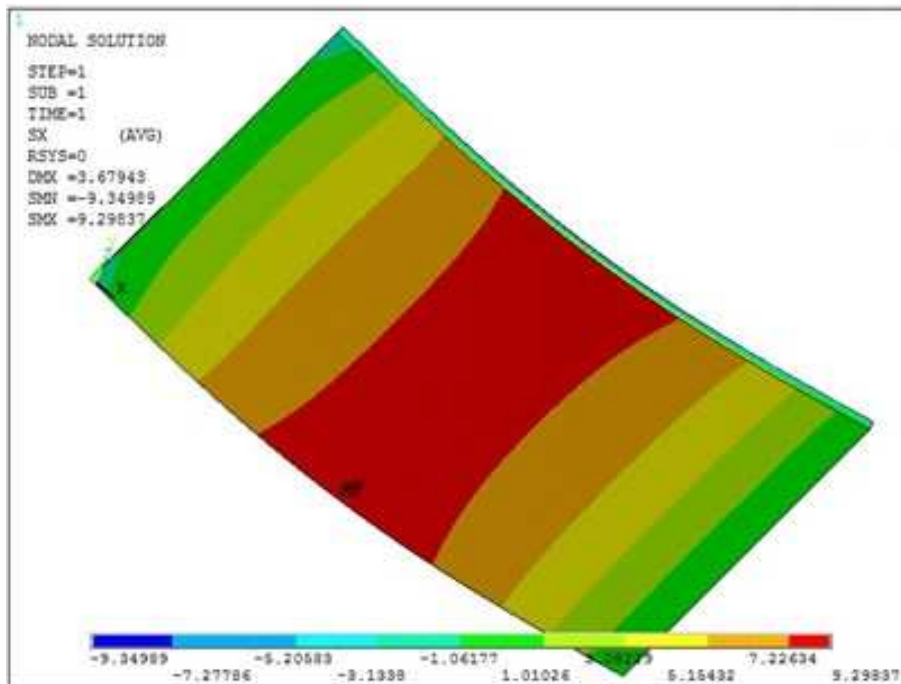


Figura 52. Tensions eix principal model assaig 1 carrega màxima

Si tornem a comparar els resultats amb els obtinguts a l'assaig, podem arribar a la mateixa conclusió que en la càrrega anterior. El valor de tensió trobat en l'assaig (7,95 MPa), tot i que no coincideix amb el màxim, si que es troba dins la franja vermella, que és on la galga estava col·locada.

Un cop donem per bo el model obtingut amb l'ANSYS, comprovem el comportament de la placa amb diferents condicions de contorn.

6.1.1.1 Totes les arestes

Una segona possible solució per el muntatge dels panells en la façana de l'edifici és recolzar-los per les 4 arestes, que tot el seu perfil quedés collat a l'estructura.

En aquest cas, com veiem en la figura 53 el desplaçament obtingut és molt menor.

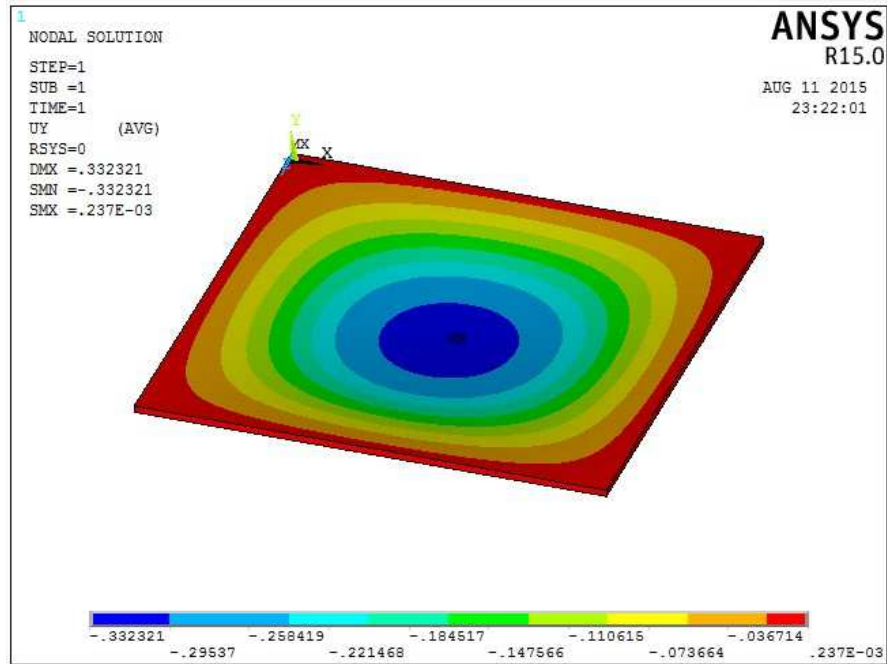


Figura 53. Desplaçament vertical recolzant panell a les 4 arestes

El valor màxim el trobem a la part central i només és de 0,33 mm.

La tensió màxima que haurà de suportar el formigó a tracció també és molt menor comparat amb el cas anterior.

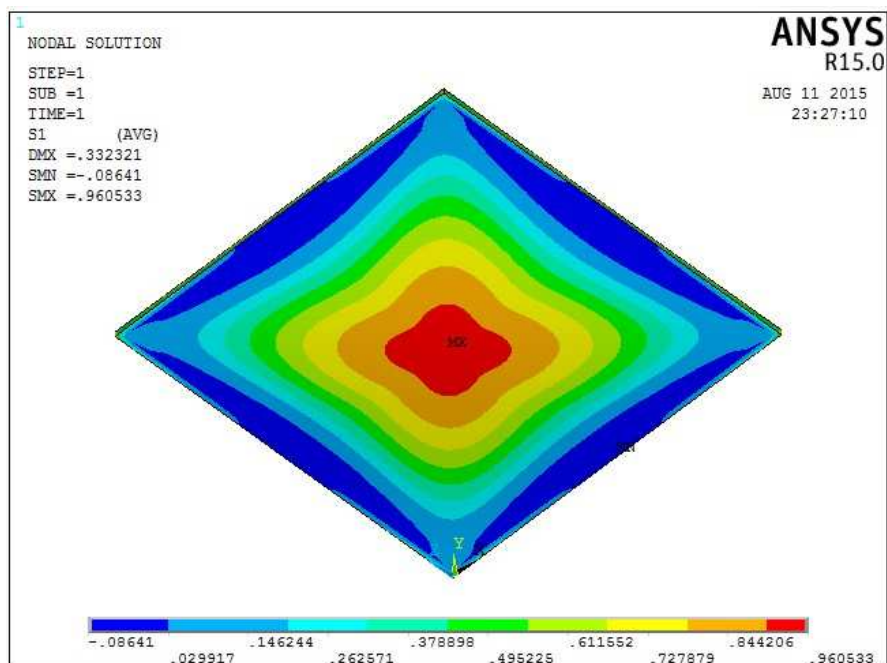


Figura 54. Tensions eix X primer assaig amb condicions de contorn 2

En la figura 54 podem veure la part inferior del panell de formigó, cara que treballa a tracció, i observem que la tensió màxima és en el punt central i és de només 0,96 MPa.

Tot i que els resultats obtinguts són molt millors, aquestes condicions de contorn no són les òptimes per a la construcció de panells de façana.

6.1.1.2 Recolzat a les 4 cantonades

Per acabar estudiarem la última condició de contorn i avaluarem quin és el comportament de la placa si la recolzem únicament per 4 zones puntuals a les quatre cantonades, deixant les arestes lliures.

El model realitzat amb el programa és el representat a la figura 55.

En les figures 56 i 57 podem veure quines són les reaccions de la placa, tan en els desplaçaments verticals com en les tensions.

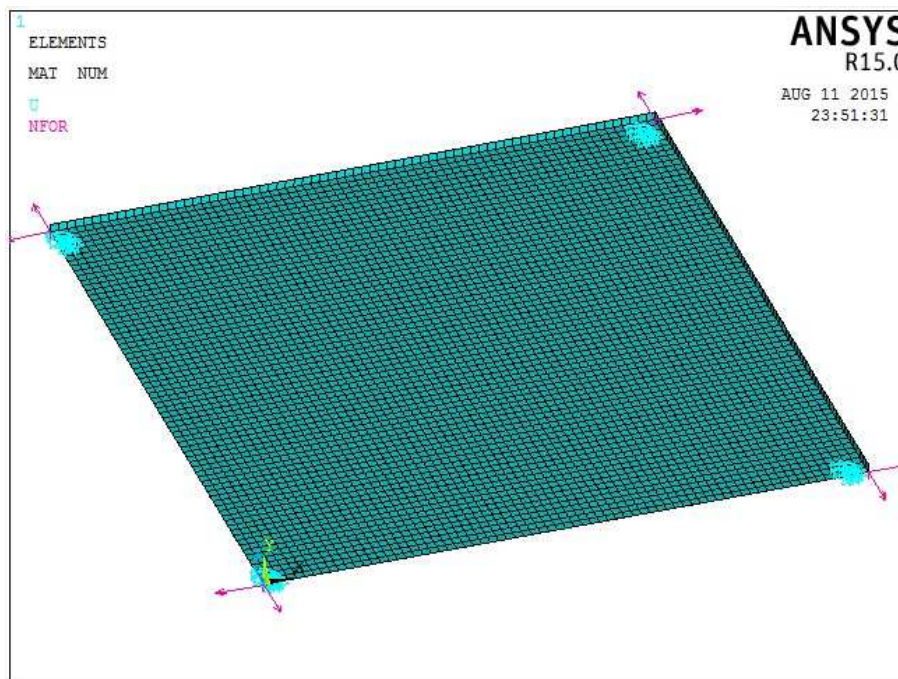


Figura 55. Condicions de contorn 3, recolzat per els quatre extrems

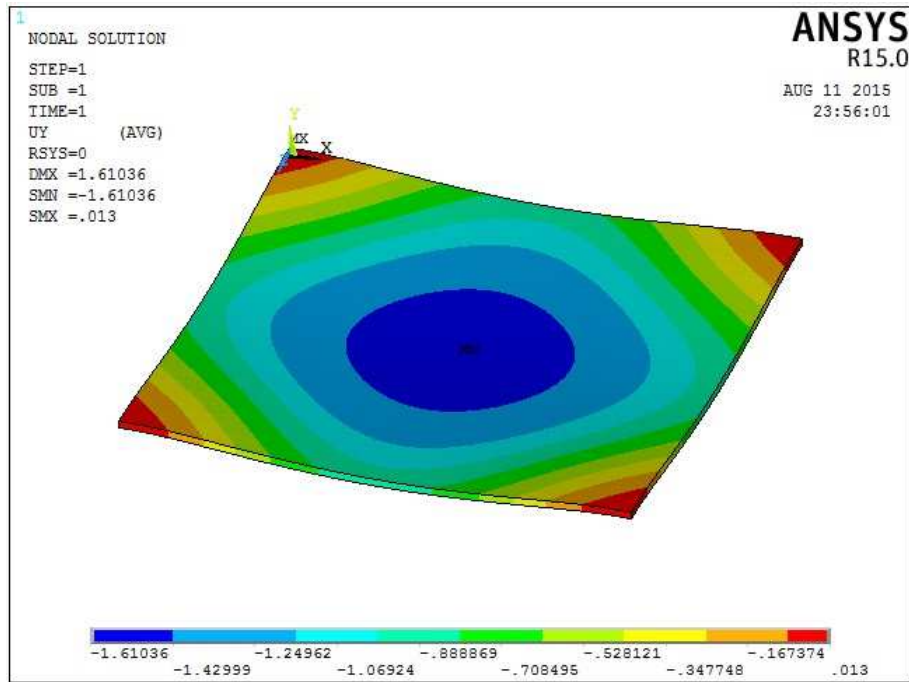


Figura 56. Desplaçament vertical primer assaig amb condicions de contorn 3

Com veiem en la figura 57 i més en detall a la 58, en aquest cas on es concentra la tensió és en els punts de recolzament. Les tensions màximes tes trobem en aquestes zones i superen la tensió límit del material.

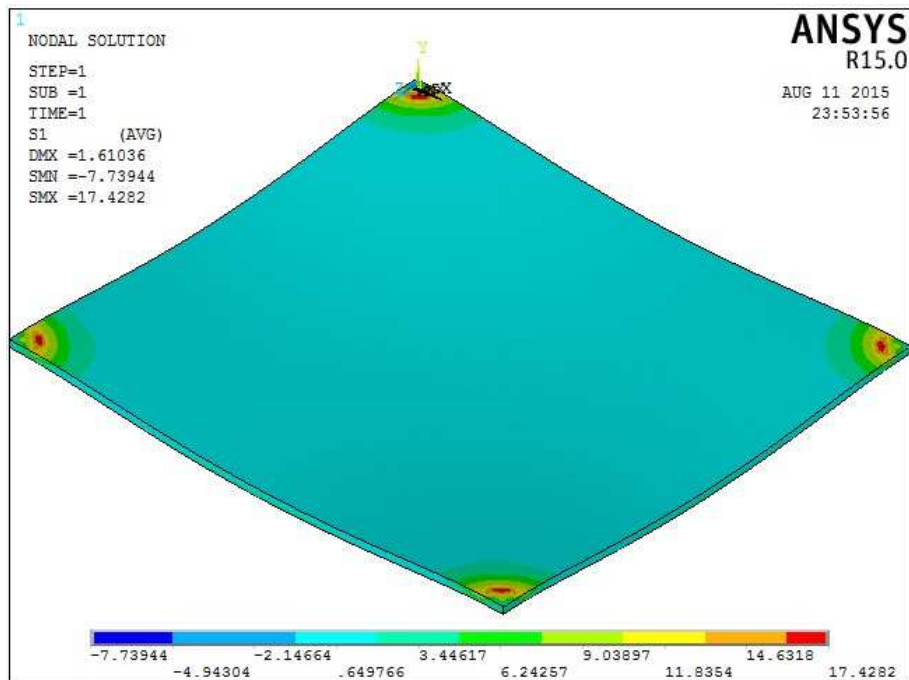


Figura 57. Tensions condicions de contorn 3

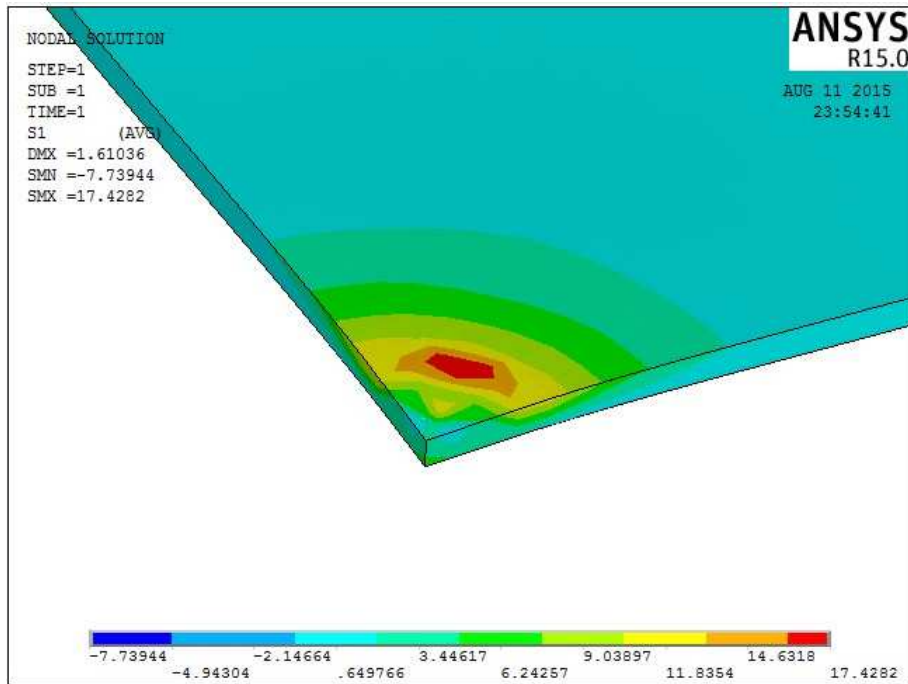


Figura 58. Detall tensions obtingudes.

Les tensions en les zones d'ancoratge són elevades i arriben a uns 17 MPa. Com hem vist en cas experimental, un cop aquest panell arriba a tensions de 8-9 MPa ja comença a fallar fins a trencar.

Per tant, amb el model de placa que tenim, de dimensions homogènies en tota la seva secció, aquesta no seria una solució aplicable, ja que per el punts de recolzament trencaria. Caldria buscar solucions per tal de reforçar aquestes zones, per exemple plaques reforçades amb nervis a la part exterior per tal de poder aguantar les tensions generades.

6.2 Model segon assaig

A continuació representarem el segon assaig amb el programa d'elements finits ANSYS amb l'objectiu de avaluar quina és l'aportació a nivell estructural del panell de poliestirè extruït.

El fet de que els panells tinguin diferents gruixos i que l'adhesiu utilitat amb la placa no ha treballat correctament no ens ha permès fer aquesta comprovació experimentalment. Com que hem vist que els models amb ANSYS es comporten correctament, farem aquesta comparació de placa amb aïllant i sense mitjançant el programa informàtic.

El model a estudiar és el que veiem en la figura 59, el panell de UHPFRC amb la placa unida. El primer pas serà representar exactament l'assaig dut a terme al laboratori i tot seguit aplicar les mateixes càrregues i condicions sense el panell de poliestirè.

Compararem els resultats per avaluar quina és l'aportació del panell.

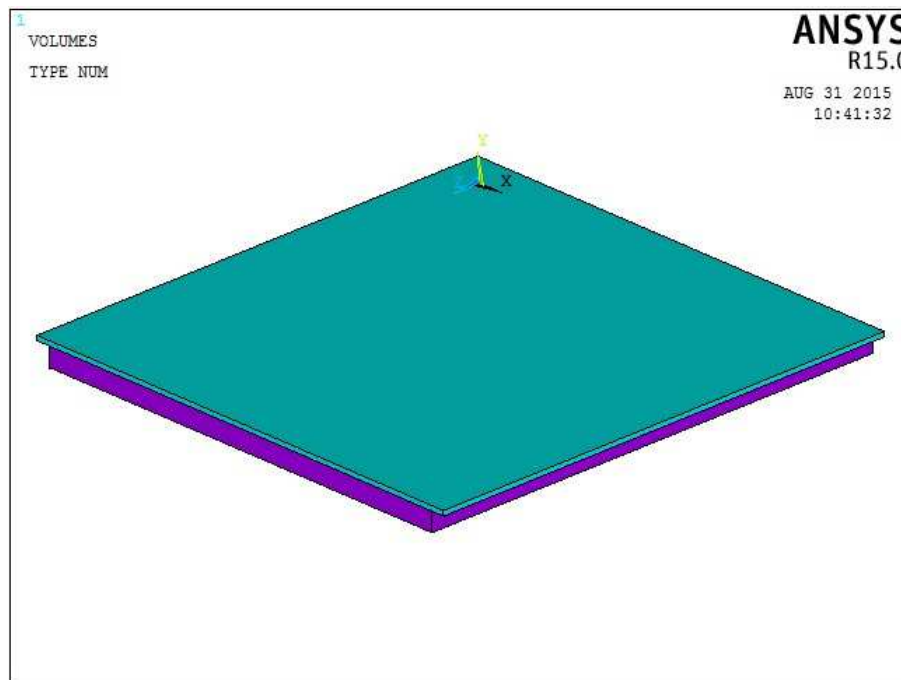


Figura 59. Model segon assaig. Panell UHPFRC amb placa aïllant.

Els resultats imitant l'assaig al laboratori, amb la carrega de 150 kg, són els següents:

- Desplaçament vertical màxim: els valor obtingut és de 7,94 mm. Si observem la gràfica de l'evolució del desplaçament en el cas experimental, abans d'iniciar el trencament el valor s'aproxima molt a l'obtingut.

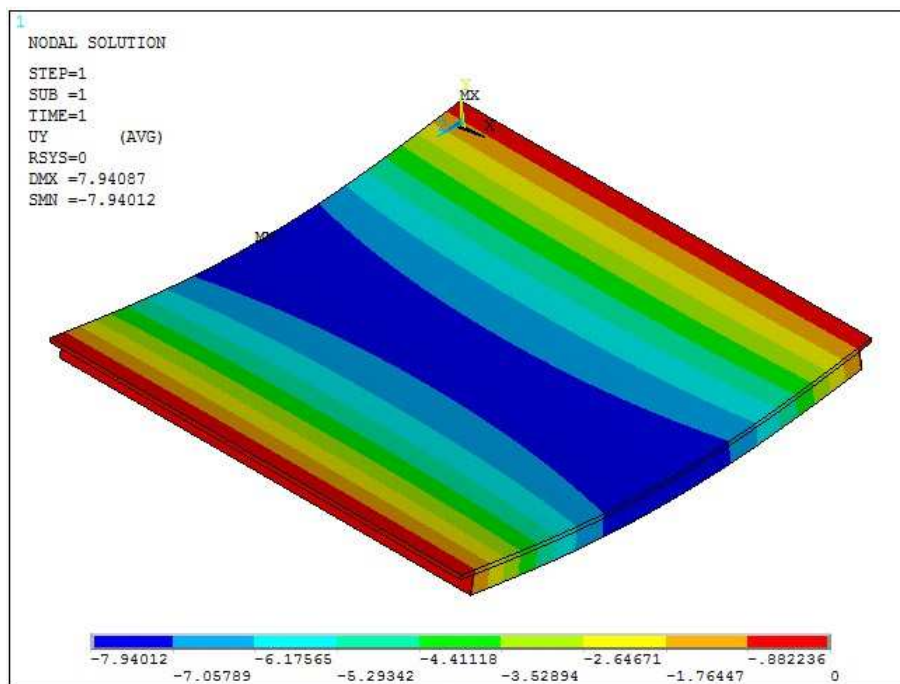


Figura 60. Desplaçament vertical model segon assaig

- Tensions en l'eix principal: com podem veure a la figura 61, la tensió màxima a tracció que arriba la placa de 9 mm de gruix a la part central és de 12,81 MPa. Aquest valor supera el límit de resistència a tracció i per tant trenca, igual com ha passat en l'assaig al laboratori.

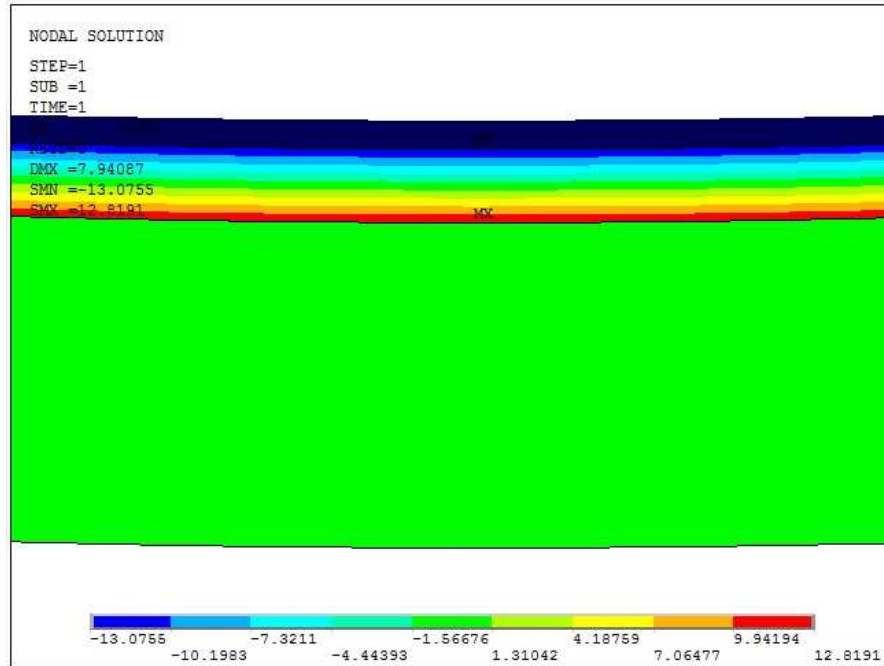


Figura 61. Tensions eix principal model assaig 2

A continuació repetirem el mateix estudi sense la placa de poliestirè i compararem resultats.

- Desplaçament vertical màxim: el valor obtingut és 9,13 mm.

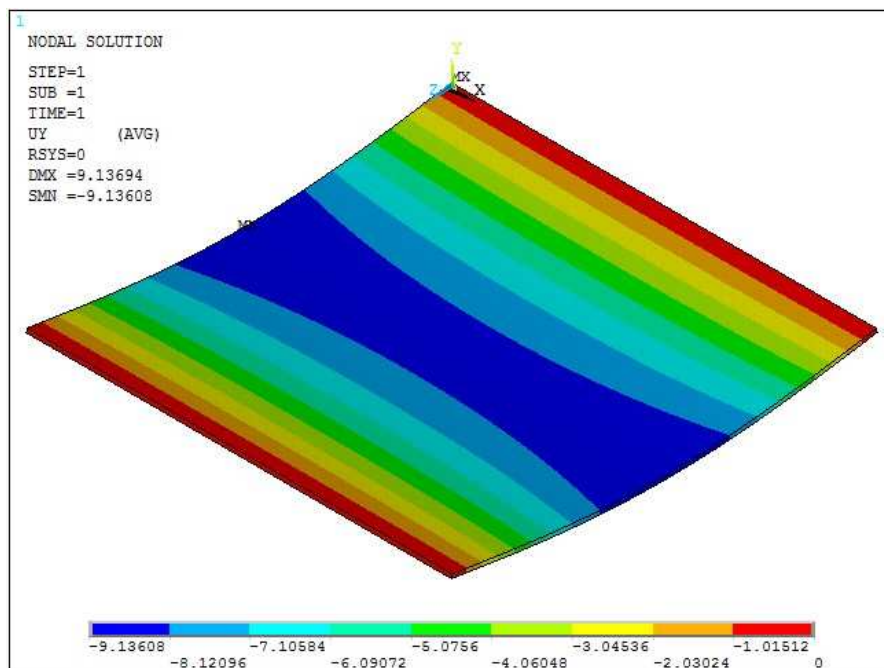


Figura 62. Desplaçament vertical panell segon assaig sense placa aïllant

- Tensions en l'eix principal: en la part central la tensió màxima a tracció arriba fins els 14,88 MPa.

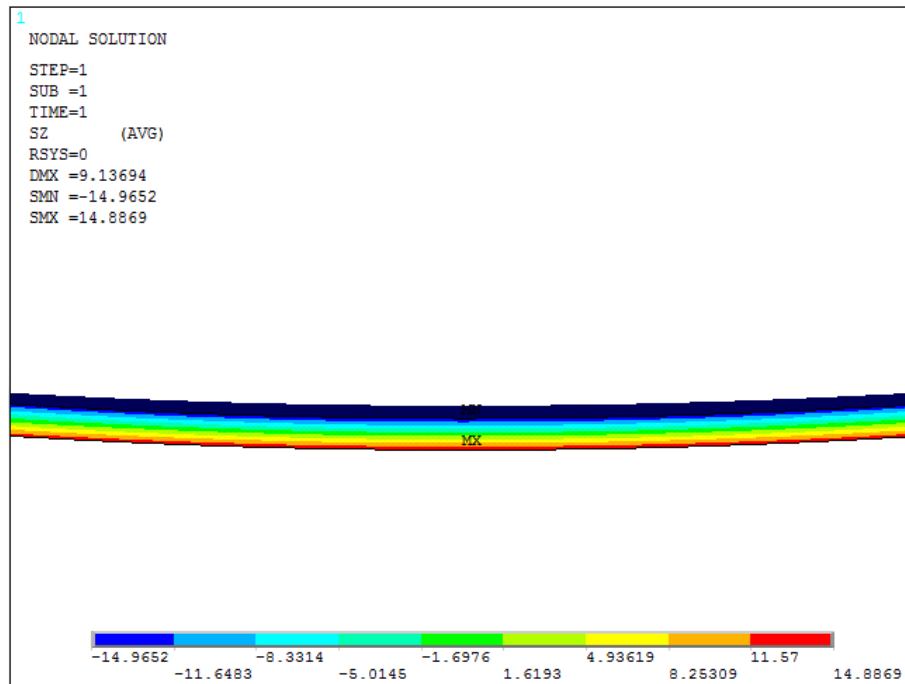


Figura 63. Tensions eix principal panell segon assaig sense placa aïllant

Comparant els resultats obtinguts amb els models realitzats amb el programa ANSYS podem arribar a una ràpida conclusió sobre el comportament del panell amb o sense placa de poliestirè: el comportament estructural millora quan al panell hi afegim una placa aïllant.

Tan del desplaçament vertical màxim com les tensions màximes a suportar disminueixen quan afegim la placa aïllant. En la taula 10 veiem la comparació dels resultats màxims obtinguts amb i sense placa aïllant.

	Desplaçament vertical (mm)	Tensió (kN)
Amb placa aïllant	7,94	12,81
Sense placa aïllant	9,13	14,88

Taula 10. Comparació resultats màxims obtinguts amb i sense placa aïllant

Així, la utilització de plaques aïllants de poliestirè extruït unides als panells de façana tenen una significativa aportació a nivell de reaccions estructurals.

Al no haver pogut comprovar també experimentalment aquest comportament, no podem aprofundir molt més, però és un punt molt interessant a estudiar en projectes futurs.

7 ESTUDI ECONÒMIC

En el present apartat estudiarem la viabilitat econòmica del material per l'aplicació que l'hem utilitzat en el projecte. Estructuralment ja hem vist que és un material idoni per treballar com a panell de façana, sempre tenint en compte la importància de les seves dimensions. El principal competidor del UHPFRC per aquesta aplicació no és el formigó usual si no el GRC (Glass Reinforced Concrete) o GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete), el formigó reforçat amb fibres de vidre. Ja en els últims anys, el GRC ha desbancat al formigó usual en l'aplicació de panells de façana.

Per poder comparar els dos materials i elaborar un estudi econòmic primer ens caldrà conèixer una mica més el material GRC.

7.1 GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete)

El GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) és un tipus de formigó reforçat amb fibres. Aquest s'utilitza principalment en panells de construcció de façanes exteriors i també com a elements prefabricats de formigó arquitectònic. És un material menys dens que l'acer i molt bo per fer elements amb diferents formes en la part frontal d'un edifici.

Els components d'aquest formigó són sorra fina, ciment, un polímer (generalment un polímer acrílic), aigua, altres additius i fibres de vidre (aproximadament un 5% de contingut en fibres). Podem trobar diferents dissenys de mescla, però tots són molt similars en la proporció dels diferents components. El GFRC s'ha desenvolupat principalment per la producció de components de xapa prima.

El GFRC va ser desenvolupat a la dècada de 1940 a Rússia, però no va ser fins als anys 70 que no es va començar a utilitzar.

Comercialment el GFRC s'utilitza per fabricar panells lleugers que generalment s'utilitzen com a façanes. Aquests són panells no estructurals, estan dissenyats per suportar el seu propi pes, càrregues sísmiques i de vent. Es consideren panells de pes lleuger, no per la seva densitat (que és significativament menor que el formigó usual),

si no per la esveltesa de la seva estructura. Normalment els panells van units a una estructura d'acer que suporta el panell i proporciona els punts d'unió.

Les propietats mecàniques dels materials compostos GFRC depenen del contingut de fibra, la relació aigua-ciment, la densitat, el contingut de sorra, la orientació i longitud de fibra i el contingut en polímer que s'utilitza.

7.2 Estudi econòmic

Tal com hem comentat, el formigó UHPFRC és un material que està en plena fase de desenvolupament. La seva composició és un tema que està completament obert i cada fabricant fa el seu UHPFRC, amb els components que li interessin per tal de satisfer les necessitats que es sol·liciten en cada cas.

Això fa que actualment ens sigui impossible trobar un preu estàndard del que costa el m^2 de formigó UHPFRC i aquest es regeix per el preu que marca el mercat. Els distribuïdors s'han d'adaptar al que demana al mercat per ser candidats a agafar els diferents projectes. Això fa que en alguna ocasió, per tal de ser més competitius econòmicament, es disminueixi la qualitat del formigó, sempre complint les necessitats sol·licitades.

Si fem una estimació podríem arribar a donar els següents costos aproximats per metre quadrat dels diferents tipus de formigons:

- Formigó usual: 110 €/m²
- GFRC: 130 €/m²
- UHPFRC: 200 €/m²

Si ens centrem en els panells de façana, tal com hem dit, només el GRC és competidor real amb el formigó UHPC. Les sol·licitacions que demana un panell de façana les complirem amb els dos materials, per tant en l'actualitat, econòmicament parlant, el

GRC està per davant del UHPC i una façana sempre serà més barata amb el primer material.

Per tant, per justificar la construcció d'una façana amb panells fabricats amb UHPFRC no ens podem centrar en el cost total si no que haurem de parlar d'altres avantatges respecte el GRC. Els avantatges que trobarem són:

- Reducció de l'amplada dels tancaments.

Tot i que els panells de GRC són molt prims, aquests necessiten un vestidor per tal de subjectar-los ja que tenen una alta inestabilitat tèrmica i dilata molt en cicles de canvis de temperatura. Mentre el formigó podríem fer tancaments amb 1,5 o 2 cm, amb el GRC necessitem uns 12 cm.

- Grau de permeabilitat.

Molt millor en el formigó UHPC ja que és més compacte que el GRC.

- Procés de fabricació.

El procés de fabricació del UHPC està molt més industrialitzat comparat amb el del GRC, que és més artesanal i el resultat final depèn molt de l'operari.

Si en comptes de centrar-nos en els panells de façana ho fem en elements arquitectònics esvelts, l'estalvi econòmic en el UHPC el podem trobar en l'estructura necessària per subjectar els elements.

Mentre amb el GRC necessitarem muntants cada 1,5 o 2 metres, ja que no aguanta amb llums superiors, amb el UHPC podríem col·locar-ne menys i tenir llums majors. Això ens generaria una reducció en el cost de la estructura, que, encara que el formigó UHPC sigui més car que el GRC, ens pot ser beneficiós.

8 RESUM DEL PRESSUPOST

L'elaboració del present projecte té un cost total de SET MIL QUATRE-CENTS SEIXANTA-VUIT EUROS AMB CINQUANTA-SIS CÈNTIMS (7468,56 €).

9 CONCLUSIONS

L'objectiu del present projecte era estudiar i avaluar de forma numèrica i experimental el comportament d'un panell de façana realitzat amb UHPFRC, determinant si aquest és idoni en l'aplicació mencionada mitjançant l'avaluació d'un prototip. Com hem pogut observar tan en els resultats experimentals com els obtinguts amb el programa ANSYS, el formigó UHPFRC és un material idoni per treballar com a panell de façana. Les seves propietats mecàniques permeten aguantar càrregues molt elevades utilitzant molt poc material.

Econòmicament parlant, hem comparat el formigó UHPFRC amb el seu principal competidor en l'aplicació estudiada, el GRC. Actualment és complicat obtenir un preu exacte del metre quadrat de UHPFRC ja que és un material en fase de desenvolupament. Les empreses distribuïdores adapten el cost al preu que marca el mercat en cada projecte. Amb una valoració aproximada del cost, hem vist que actualment el formigó de molt altes prestacions no pot competir amb el GRC en l'apartat econòmic quan parlem de l'aplicació com a panells de façana.

Abans d'iniciar el projecte va ser necessari fer una recerca bibliogràfica important ja que el material estudiat encara està en desenvolupament i els coneixements personals eren nuls. Això m'ha permès ampliar molt el coneixement sobre aquest nou material, especialment les seves propietats, aplicacions i comportament estructural.

Finalment, també s'han aprofitat els assaigs duts a terme per estudiar quin és el comportament en l'estat límit de càrrega, com treballen les fibres just abans del trencament i com trenca el material. Un cop el formigó esquerda per els esforços a tracció i deixa de treballar és quan actuen les fibres que donen més ductilitat i resistència al panell. En els dos assaigs hem pogut veure com han quedat les fibres en la zona del trencament, totalment orientades cap a l'esquerda. Això ens demostra el treball que realitzen quan el formigó esquerda.

Amb els assaigs duts a terme al laboratori de construccions també hem pogut comprovar que treballant amb materials tan esvelts, les petites variacions en el gruix

són molt importants. Per tan el gruix del panell és un factor molt important a controlar en la fabricació dels panells de façana de UHPFRC.

Tot i que no ens havíem marcat com a objectiu inicial, hem estudiat la contribució estructural d'un panell aïllant fabricat amb poliestirè extruït. Experimentalment, la diferència de gruixos entre les plaques i que la unió entre panell i aïllant no ha aguantat les tensions que s'han creat no hem pogut arribar a una conclusió clara. En canvi, amb els models fets amb el programa ANSYS si que hem pogut veure una millora estructural quan el panell i aïllant treballen juntament. Aquest és un punt que queda totalment obert per pròxims estudis.

10 DESENVOLUPAMENTS FUTURS

Durant la realització del projecte han sortit varis temes que en l'actual treball no s'han tractat i que per futurs estudis són interessants de tenir en compte. En aquest capítol hem recollit punts interessants per pròximes investigacions relacionades amb el formigó UHPFRC i la seva aplicació com a panell de façana.

- Fer els assaig amb plaques més homogènies i de mateix gruix. Les dos plaques que hem utilitzat al laboratori en els assaigs experimentals no eren completament homogènies. En ambdues hi havia més material a la part central que als contorns i això ha pogut afectar en la comparació entre els resultats experimentals i en l'ANSYS. També és important que si es desitja comparar comportaments entre plaques, les dimensions siguin exactament les mateixes.
- Millorar el set-up dels assaigs. És important per següents assaigs que es millori tan els suports de les plaques com el mètode per aplicar càrrega, per tal d'obtenir uns resultats més acurats.
- En el model amb ANSYS on recolzem el panell per les seves quatre cantonades, veiem que el punt de recolzament apareixen tensions molt altes i és on més pateix el formigó. L'evolució dels panells de façana són els panell nervats, per reforçar la zona d'ancoratge. Per tant, caldria estudiar quina és la geometria idònia del panell utilitzant el mínim material i així reduir costos, reforçant els punts d'unió entre placa i estructura per treballar com a panell de façana.
- En el nostre projecte hem considerat el vent com una càrrega estàtica, tot i que en la realitat el vent és dinàmic, la pressió aplicada al llarg del temps va variant. Aquesta càrrega dinàmica fa que un dels punts crítics sigui la unió entre el cargol que colla la placa i el formigó. Una possible investigació futura és l'anàlisi sota càrrega crítica de les connexions panell-suport.

11 BIBLIOGRAFIA

MICHAEL SCHMIDT I EKKEHARD FEHLING, Ultra High Performance Concrete: Reserach, Development and Application in Europe, 2005.

(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.472.5557&rep=rep1&type=pdf>, 4 d'abril de 2015)

BENDT AARUP, A Special Fibre Reinforced High Performance Concrete. CRC Technology, Denmark. 2006.

(http://www.crc-tech.com/Files/Billeder/crc-tech_uk/docs/crc_paper_for_chicago_symposium.pdf, 5 d'abril de 2015)

PEDRO SERNA, JUÁN ÁNGEL LÓPEZ, ESTEBAN CAMACHO, UHPFRC: De los Componentes a la estructura, 54è Congres Brasiler del Formigó IBARCON, 8-11 d'octubre

KLAUS DROLL, Influence of additions on ultra high performances concretes – grain size optimisation. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Perfomrance Concrete. Kassel, Setembre 2004

(http://www.researchgate.net/profile/Lesday_Martinez/publication/271196269_Lime-pozzolan_binder_as_a_very_fine_mineral_admixture_in_concrete/links/54bffe160cf28a6324a03408.pdf#page=301, 10 d'abril de 2015)

PETR MACA, RADOSLAV SOVJAK, TOMAS VAVRINIK. Experimental INvestigation of Mechanical Properties of UHPFRC. Concrete and Conctere Structures 2013 Convergence.

IVAN MARKOVIC, High performance hybrid reinforced fibre concrete. Development and utilization. PhD-Thesis, Universitat Tecnologica de Delft, Gener 2006.

BENJAMIN A. GRAYBEAL I FLORENT BABY, Development of Direct Tension Test Method for Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Març-Abril de 2013.

KENT L. LAWRENCE. ANSYS Examples.

(http://mae.uta.edu/~lawrence/ansys/ansys_examples.htm, 20 de maig de 2015)

CHUNPING GU, GUANG YE I WEI SUN, Ultrahigh performance concrete-properties, Applications and perspectives, Science China Technological Sciences, Abril 2015.