

FORM FINDING A L'ARQUITECTURA

L'ÚS DE NOVES TECNOLOGIES I MATERIALS AL PROJECTE
ARQUITECTÒNIC

ANÀLISI ESTRUCTURAL I OPTIMITZACIÓ D'ESTRUCTURES
AMB ELEMENTS D'UHPC

Carles Gómez López

Projecte de final de carrera - Arquitectura

Director: Miquel Llorens Sulivera



FORM FINDING A L'ARQUITECTURA

L'ÚS DE NOVES TECNOLOGIES I MATERIALS AL PROJECTE
ARQUITECTÒNIC

ANÀLISI ESTRUCTURAL I OPTIMITZACIÓ D'ESTRUCTURES
AMB ELEMENTS D'UHPC

Dóno les gràcies a totes les persones que, al llarg d'aquests mesos, m'han fet costat i m'han donat suport.

Als meus companys i companyes del Col·lectiu la Mosca, que han estat comprensius malgrat les responsabilitats que teníem com a grup.

A la Roser i a en Miquel, que m'han acompanyat durant tot el treball.

A la meva família, per fer-me costat dia a dia. I especialment a la meva mare, amb qui sempre he trobat el recolzament necessari.

Entendiendo la tecnología como 'el esfuerzo que se hace para evitar el esfuerzo' [...], y considerando que el esfuerzo repercute en un coste si no humano cuando la mano de obra es barata, por lo menos sí en un coste material, sin duda que en algunos casos la economía debía ser también, junto a la estática, un imperativo de suficiente peso como para merecer de recursos tecnológicos más escrupulosos que la tradición y la mera suerte a la hora de asegurar la buena construcción de éstas estructuras. (Soler, 2013)

L'ús de la tecnologia, sigui quina sigui, és present des del primer moment en aquest projecte, ja que ens permet desenvolupar, o bé amb més profunditat o bé amb més celeritat, parts del disseny arquitectònic i constructiu que acostumem a fer a mà o els quals basem en normatives massa restrictives.

Per una banda, l'ús d'un material nou en arquitectura, l'UHPC, que és usat majoritàriament en obres d'enginyeria i que comença a tenir aplicacions, tot i que escasses, en arquitectura. Per altra, l'ús d'eines informàtiques que ens permeten fer estudis estructurals exhaustius i conèixer a fons el comportament d'una estructura davant les accions externes.

Però l'ús de la tecnologia ha de venir acompanyada d'un objectiu més gran, que pels arquitectes és el trobar la forma d'un edifici. Wright parlava de l'arquitectura orgànica, aquella que revela la seva forma a partir de la funció de cada estança, i per tant és òptima per naturalesa. En el cas de les estructures, la forma òptima és aquella que dona la millor resposta estructural amb el material que s'utilitza.

El repte de trobar la forma òptima és molt antic, Va adquirir una importància especial amb l'inici de l'art gòtic, i no va ser fins ben entrada l'edat contemporània van començar a parar atenció, de

nou, en com es comportaven les estructures i quina relació guarden l'estructura amb la seva forma i el material emprat.

Els últims anys, animats per Robert Venturi i amb l'aparició de software de càlcul estructural, aquesta relació tan estreta que es buscava entre la forma i la funció s'ha perdut en virtut de l'arquitectura fluïda, aquella que primer genera les formes de l'edifici i, posteriorment, resol l'estructura que ho ha de suportar, sense importància de com seràn els elements mentre la forma final sigui la desitjada. Aquí destaquen edificis de les firmes de Frank Gehry o de Zaha Hadid. En molts casos, aquest edificis suposen una despesa econòmica immensa que es fa pal·lès quan es tracten d'edificis públics.

Al cap i a la fi, el procés arquitectònic, on s'inclou el disseny, el càlcul estructural i el procés constructiu, depèn molt del pressupost. En aquest punt, les eines de què he parlat abans, la tecnologia, ens pot ser de gran ajuda per arribar a tenir l'edifici desitjat amb una despesa justa.

Però per sobre de tot, l'arquitecte és el responsable de l'edifici. Independentment del pressupost, s'han de complir uns requisits estructurals i de seguretat que són condició *sine qua non* perquè l'obra arquitectònica pugui ser utilitzada.

Index de continguts

1	Form finding: trobar la forma òptima	13
1.1	L'observació de la natura	13
1.2	L'aproximació a la forma	14
2	Introducció i objectius	21
2.1	UHPC: aplicacions en arquitectura	21
2.2	Objectius del treball	28
2.3	Mètode de treball	29
3	Gare de Montpellier	31
3.1	Definició estructural de la coberta	39
3.2	Discretització de l'estructura	41
4	Característiques de l'UHPC	43
4.1	Manipulació	43
4.2	Economia de l'UHPC	44
4.3	Sostenibilitat	45
4.4	Components	46
4.5	Propietats mecàniques	46
4.6	Característiques físiques	48
4.7	Comparació de l'UHPC amb altres formigons	49
5	Anàlisi estructural	51
5.1	Condicions inicials	51
5.2	Estats límit i combinacions de càrregues	52
5.3	Geometria i anàlisi: introducció a l'entorn ANSYS	53
5.4	Segon anàlisi	55
6	Optimització	57
6.1	Què significa optimitzar?	57
6.2	Objectius del procés d'optimització, secció i variables de disseny	59
6.3	Segona optimització: parametrització de la geometria i anàlisi amb ANSYS	61
6.4	Biga corbada o arc?	65

7	Valoració dels resultats	71
7.1	Utilitats de l'optimització: efectes sobre el disseny	71
7.2	Conclusions	77
7.3	Reptes de futur	78
8	Fonts d'informació	83
9	Annexos	85
9.1	Resultats dels anàlisis amb ANSYS	85

1 Form finding: trobar la forma òptima

Des dels primers edificis, la tendència d'ús de cada material ha estat aquella que permetia utilitzar-lo sense comprometre'n la seva integritat. Abans de la descoberta i l'inici de l'ús de l'acer en edificis – des dels primers poblats sedentaris, però sobretot a partir de les edificacions mesopotàmiques, egípcies i, més endavant, els edificis grecs i romans, existien tan sols materials extrets directament de la naturalesa: pedra, argila i calç (però especialment els dos primers). Els usos per a cada material eren diferents: per norma general, en les ciutats i grans edificis, s'utilitzava la pedra per als elements estructurals, i es col·locaven de manera que el conjunt treballava només per l'acció de la gravetat; en canvi les cases de les afores, i aquí sí les primeres cases de poblats sedentaris, es construïen amb una mescla d'argila, aigua i sorra. En ambdòs casos, la fusta era un element recurrent per a fer les parts horitzontals.

Amb l'aparició de l'acer, el segle XIX, el llenguatge constructiu va canviar per complet. És un material elàstic, rígid, dúctil i, a més a més, treballa tant bé a compressió com a tracció. El paradigma de la construcció va canviar per complet, i el volum total de material utilitzat es va reduir dràsticament. Però la gran revolució en la construcció arquitectònica va venir de la mà del formigó armat: combinava la resistència a la compressió dels materials rocosos amb la resistència a la tracció de l'acer, i permetia crear elements constructius que treballessin a flexió. I malgrat que el ciment era un producte industrial car i contaminant, la gran producció va reduir-ne el preu fins a convertir-se en un material assequible per a tothom. Però la part que ens ocupa del formigó és que va fer oblidar que cada material i cada estructura té una forma òptima de transmetre les càrregues.

Cada material i cada estructura té una forma òptima que fa que el seu rendiment i la seva eficiència sigui màxima

1.1 *L'observació de la natura*

Molts constructors i teòrics al llarg del temps s'han fixat en com la natura genera les seves formes: la ramificació de les branques dels arbres o l'estabilitat de les plantes per a no caure. De fet, la natura s'adapta constantment i modifica la seva estructura per a adequar-se a les condicions externes: és a dir, optimitzar la forma dels seus elements emprant l'estructura més senzilla possible i el mínim esforç.

Un dels exemples més visuals a què puc fer referència és com la forma d'un arbre es modifica a causa d'accions externes. Els arbres són éssers vius que estan en creixement constant, tot i que són quan són més "educables" és en els primers anys de vida. Sotmetre l'arbre a diferents accions mecàniques — el vent és la principal — fa que l'estructura interna i de cada una de les seves parts variï per a obtenir la millor resposta estructura. Per exemple (Stokes, 1994), l'exposició d'un arbre a l'acció del vent amb una magnitud i una durada que li permetin retornar a la vertical provocarà una resposta interna. L'arbre concentra el seu creixement en aquelles àrees que han estat estimulades mecànicament, de manera que la zona concreta augmenta la rigidesa i els esforços locals es van reduint amb el pas del temps (Mattheck 1991). Igual que les branques adquireixen una forma, el sistema d'arrels també adquireix una forma i augmenten el seu diàmetre perquè pugui transmetre les càrregues cap al sòl d'una manera suau, així com també creixen en determinades direccions perquè l'arbre es mantingui ancorat. (figures 1 i 2).

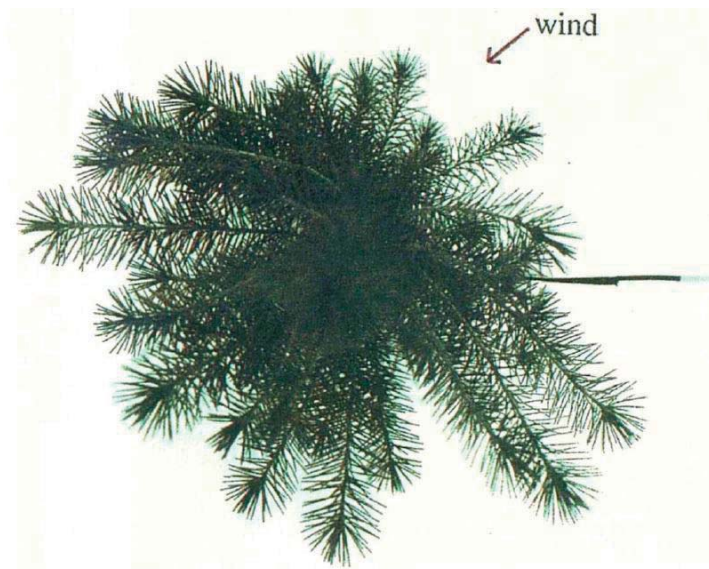


Figura 1-1



Figura 1-2

1.2 L'aproximació a la forma

Molts arquitectes, enginyers i constructors, entre altres experts, han utilitzat la geometria com a fil conductor dels seus projectes. Cada un, però, s'hi ha aproximat de maneres i amb exemples diferents, i amb objectius diferents, però sempre seguint la frase atribuïda a Louis Sullivan, «form follows function» (Sullivan, 1977).

Sullivan, en el llibre *The tall office building considered artistically* (1896) es pregunta quina hauria de la manera de donar forma a quelcom que no ha existit fins aleshores, en el sentit funcional, i posa l'exemple de com els éssers vius tenen formes externes semblants (el cap, les extremitats, el tòrax) però internament, a causa de les característiques del medi cada ésser viu ha anat evolucionant per desenvolupar-se de la millor manera possible.

Igualment, també parlava dels materials, i apuntava que cada material havia de ser tractat d'una manera singular i diferent als altres, ja que cada un té estructures diferents. Concloïa, aleshores, que els dissenys apropiats per un material no serien els millors per altres materials.

Frank Lloyd Wright, que havia treballat amb Sullivan (i a qui considerava el seu mentor), va seguir treballant en aquestes línies, però va avançar cap a una perspectiva més holística: «form and function are one» (Wright, 1954: 23), i ho explicava en termes de natura, de quelcom *orgànic*.

El 1926, l'arquitecte alemany Walther Bauersfeld va rebre l'encàrrec de crear una estructura que permetés crear un planetari per a la companyia per a la que treballava, l'òptica Carl Zeiss, a Jena. Fins aleshores no s'havia construït res semblant: havia de ser un edifici de grans dimensions i amb l'espai interior lliure, de manera que el projecte pogués projectar les imatges sense obstacles. Bauersfeld, va fer mitjançant l'estudi de l'icosaedre (un sòlid platònic format per 20 triangles equilàters (figura 1-3)), va dissenyar la primera cúpula geodèsica¹² de la història.

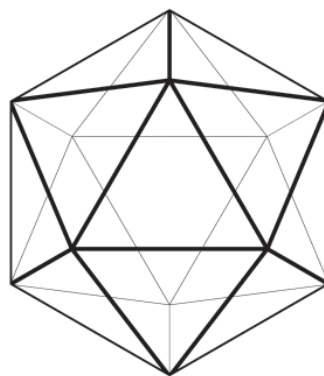


Figura 1-3

La cúpula estava formada per una estructura de barres metàl·liques (que formaven triangles), i mesurava 26 m de diàmetre i tenia una capacitat de 500 persones. L'interior es va revestir de formigó blanc per a fer-hi les projeccions.



Figura 1-4

La popularitat de les cúpules geodèsiques va venir de la mà de Richard Buckminster Fuller i les es-

1 El terme cúpula geodèsica, no obstant, va ser acunyat per Buckminster Fuller, més de 20 anys després de la construcció de la cúpula de Bauersfeld.

2 La geodèsia és la branca de la geofísica que estudia la forma i les dimensions de la superfície de la Terra.

estructures *tensegrity*. Tot i treballar també sobre la forma i la funció dels espais, amb idees innovadores com la Dymaxion house, una de les seves aportacions més importants a l'enginyeria i l'arquitectura van ser les *tensegrity structures*. després de molts treballs i estudis sobre estructures i construccions que milloressin la vida de les persones, així com l'ús d'investigacions científiques, va publicar el llibre *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*. En aquest llibre, Buckminster Fuller exposa i explica de manera exhaustiva i detallada la seva teoria sobre geometria i de com les parts d'un conjunt tenen unes propietats i un comportament molt diferent que cada una de les seves parts aïllades, de manera que l'estudi d'una de les parts no permet predir el comportament del conjunt (sinergia).

En altres paraules, l'estructura no és un conjunt d'elements jeràrquics – biga, jàssera, pilar, llosa –, sinó que cada element actua sobre els altres, de manera que es generen estructures d'una alta complexitat. Per a Buckminster Fuller, les cúpules geodèsiques eren atractives perquè reunien tres particularitats que van ser clau: és una estructura molt forta amb una massa baixa, la seva estructura "omnitriangulada", i tanca el màxim volum amb la mínima àrea de la seva superfície.



Figura 1-6

1.2.1 Estructures traccionades

Aquestes estructures són presents en la naturalesa, i la seva manifestació més estesa són les membranes. Per exemple, la tensió superficial d'alguns líquids, com l'aigua. Les molècules d'aigua creen tensions a la superfície del líquid i permet, per exemple, que certs objectes o animals hi flotin, o que una gota d'aigua, aïllada, adquireixi forma esfèrica.



Figura 1-5

Un dels primers arquitectes a observar el comportament de les membranes va ser l'arquitecte alemany Frei Otto també va destacar en el camp de les estructures lleugeres, i concretament en les cobertes suspeses. Aquest tipus d'estructures tam-

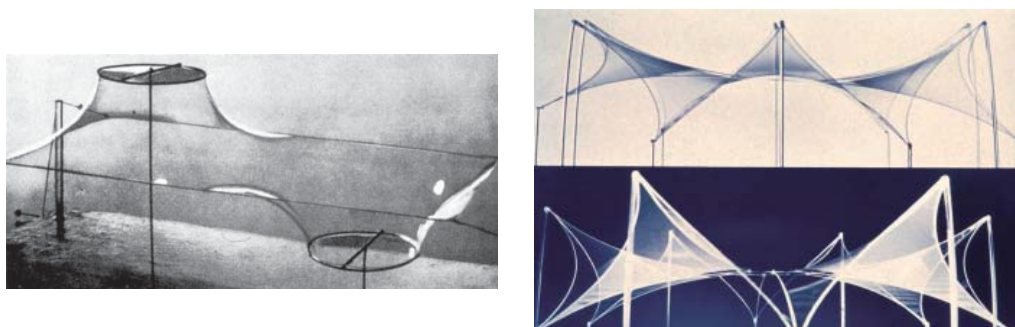


Figura 1-7 Models realitzats amb pel·lícules i bombolles de sabó.

bé es basa en la resistència a la tracció dels seus elements per poder generar geometries complexes i molt estables. Otto estudiava atentament les formes mitjançant l'experimentació amb bombolles de sabó, observant com variaven les superfícies quan s'afegien elements rígids a les membranes, per



Figura 1-8 Complex olímpic de Múnic 1972, de Frei Otto.

copiar les formes en els seus dissenys, com el complex esportiu que va allotjar els Jocs Olímpics de 1972 a Múnic.

1.2.2 Estructures comprimides

Materials com la pedra o el formigó armat tenen unes característiques físiques i mecàniques així com una estructura interna concretes, de manera que la millor manera d'utilitzar-los és amb estructures que treballin a compressió pura, eliminant qualsevol esforç de tracció. Aquest tipus d'estructures es manifesten, per exemple, als ruscs de les abelles. Les abelles utilitzen el seu cos com una plantilla per a generar cel·les perfectament cilíndriques. La superposició de les cel·les, amb el pas del temps, aixafa els cilindres i es converteixen en hexàgons regulars.

Històricament, els arcs (voltes i cúpules), han estat presents en la majoria d'edificis públics. El romànic ja va introduir aquests elements, tot i que seguia construint de manera massiva, utilitzant gran quantitat de material i amb unes alçades moderades (també en part pel que representava l'art en aquella època). En el gòtic, per altra banda, predomina la llum i l'expressivitat (al contrari que amb el romànic), per això les catedrals també són diferents, més esveltes i amb elements més abri-nats, ja que eren coneixedors de com funcionava la geometria de cada material, quines formes ha-

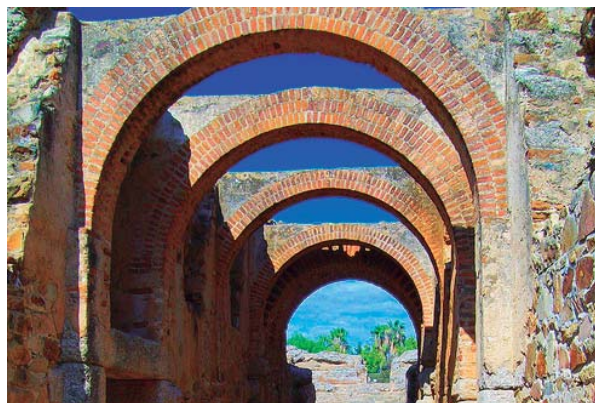


Figura 1-9 (esquerra) Arcs de mig punt de l'amfiteatre de Mèrida.

Figura 1-10 (dreta) Interior de la Catedral de Santa Maria de Girona, on s'hi posen veure els arcs ogivals i les voltes de creueria gòtics.

vien de donar-los i quins elements estructurals calia executar perquè les càrregues es transmetessin perfectament cap al terra sense colapsar. Per això, però, no utilitzaven arcs de mig punt, ja que en el punt més alt són horitzontals (és un punt que no és capaç de transmetre càrregues verticalment)

Un dels arquitectes que més va experimentar en aquest camp va ser Antoni Gaudí. Gaudí utilitzava



Figura 1-11 Model funicular de la colònia Güell.

models funiculars per a generar la forma dels edificis. Per això, feia un model amb cadenes, fils, trossos de tela i ploms que penjava començant per una superfície elevada. Per efecte de la gravetat, el conjunt d'aquests elements donava com a resultat maquetes singulars i úniques per a cada projecte.

Eero Saarinen, arquitecte finès i estatunidenc, també va treballar sobre la forma òptima d'una



Figura 1-12 Gateway Arch (1965), St. Louis, Missouri.

estructura comprimida. Ho va fer amb el Gateway Arch, de 1965, construït a St. Louis, a l'estat de Missouri. És una estructura en forma d'arc catenari invertit, de 192 m d'alçada, executat amb acer inoxidable. És una estructura contínua confeccionada a trams, essent les seccions més grans

com més s'apropa al terra, per tal de transmetre bé totes les càrregues que provenen del material superior.

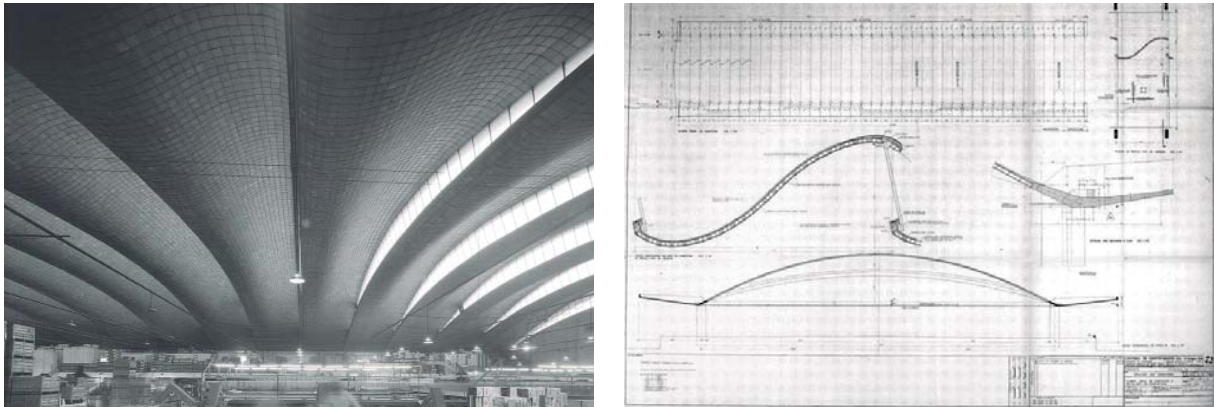


Figura 1-13 Mercat de Porto Alegre, 1974, dissenyat per Eladio Dieste.

El treball conjunt entre diferents materials, com el formigó, l'acer i la ceràmica, també han estat objecte d'estudi. Eladio Dieste, qui va denominar aquesta combinació "ceràmica armada", va aprofitar les qualitats d'aquests tres elements per a construir elements petris molt lleugers i molt resistents gràcies a donar formes corbades a les làmines, per tal que sigui la geometria l'encarregada de resistir els esforços i no pas el material.

En el camp de les estructures de formigó armat, un dels més reconeguts en l'estudi de formes va ser l'arquitecte espanyol i mexicà Félix Candela. Les seves obres tenen un marcat caràcter formal que

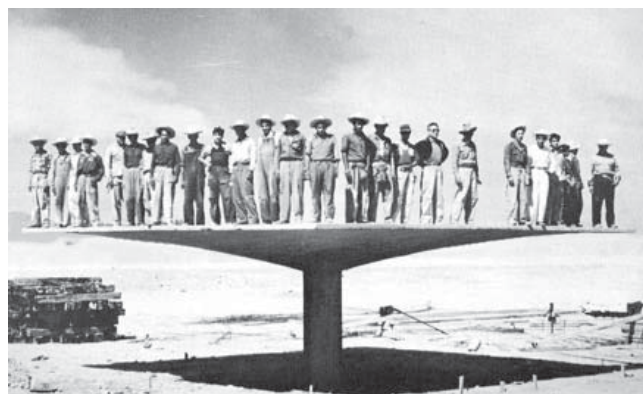


Figura 1-14 Restaurant submarí de l'Oceanogràfic.

ve determinat per l'estudi de models matemàtics, especialment el paraboloid hiperbòlic. autor de l'Oceanogràfic (2003) de la Ciutat de les Arts i les Ciències de València (figura 1-19). Aquest edifici

es caracteritza per l'ús del formigó armat mitjançant formes que facin que el material treballi exclusivament a compressió. Gràcies a aquest treball geomètric, el gruix de la closca de formigó es pot reduir fins a dimensions mínimes.



Figura 1-15 Mannheim Multihalle, dissenyat i construït per Frei Otto.

Les estructures comprimides també són possibles amb elements lineals de fusta o d'acer, com el cas del Mannheim Multihalle, com les cúpules geodèsiques de Buckminster Fuller o les obres de Frei Otto, com el Mannheim Multihalle. Tota l'estructura de la coberta està conformada per elements lineals units pels extrems. El conjunt reposa sobre uns suports, fent que l'estructura tingui un comportament òptim a compressió.

2 Introducció i objectius

2.1 UHPC: aplicacions en arquitectura

Com un material capdavanter en la investigació sobre el formigó, el formigó d'ultra altes prestacions – conegut per les seves sigles UHPC, ultra high performance concrete – ens proporciona una nova tecnologia per expandir la indústria de la prefabricació. La combinació de propietats superiors facilita l'aptitud per a dissenyar productes de poc gruix, formes complexes, corbes i textures personalitzades, abastant un terreny on el formigó tradicional no podia arribar.

L'UHPC permet una ampla varietat de composicions que permeten el seu ús en elements arquitectònics o estructurals. En el cas d'elements estructurals, amb reforç de fibres metàl·liques amb una alta presència de carboni, permet arribar a 200 MPa en esforços de compressió i a 20 MPa d'esforços de flexió.

L'UHPC arquitectònic, reforçat amb fibres d'alcohol de polivinil, adquireix resistències de 117 MPa a compressió i 20 MPa a flexió. Gràcies a aquestes prestacions, l'armadura passiva és gairebé o completament innecessària, i la seva fluïdesa permet reproduir la formes i textures amb molta precisió. Per això les seves aplicacions s'estenen més enllà dels propis elements estructurals i les obres d'enginyeria, com per exemple panells perforats per a façanes, mobiliari urbà, escales i paviment de gran format.

A part de les seves prestacions mecàniques, l'UHPC té nombrosos avantatges que redueixen el cost global, com la seva producció, la quantitat que es requereix per conformar peces, el seu manteniment o la velocitat de construcció.

L'UHPC és molt valorat en l'elaboració de peces arquitectòniques de formigó. Les seves prestacions mecàniques permeten reduir el nombre d'elements necessaris, eliminar l'armadura passiva, dissenyar i executar estructures amb voladissos i fabricar elements, de molt poc gruix, sostenibles i amb una llarga vida útil.

Entre el formigó armat i l'UHPC, les capacitats mecàniques de l'últim augmenten considerablement, especialment la resistència a compressió, que augmenta de 6 a 20 vegades segons la densitat de fibres del formigó. També destaca el comportament excel·lent de l'UHPC al glaç i a la corrosió, fins i tot en gruixos molt baixos. La seva composició fa que sigui un material molt poc porós, gairebé impermeable, donant-li resistència a la corrosió, l'abrasió i la carbonització, així com una bona resistència als impactes i al foc, i per tant és apte per a estructures en ambients durs i per a edificis amb exigències estrictes de seguretat i manteniment.

En tots els edificis i construccions on s'ha utilitzat l'UHPC s'han utilitzat motlles per a conformar les peces, ja que es requerien gruixos molt petits, formes complexes o textures concretes. De fet, el disseny del motlle i l'emmotllat del formigó representa una part molt important del procés de manipulació, de la mateixa manera que ho és l'encofrat en els processos habituals de construcció amb formigó armat. És per això que l'UHPC és usat sempre en forma de peces prefabricades.

Alguns exemples on s'han utilitzat peces prefabricades d'UHPC són els següents.

2.1.1 Elements arquitectònics

Panells opacs i perforats

És una de les aplicacions més exteses. L'UHPC permet fer peces amb gruixos molt més petits que el formigó convencional, i per tant les peces són més lleugeres, i es poden reproduir formes complexes i corbes amb facilitat.

Resisteix bé els agents externs, per la qual cosa és apreciat per a elements exteriors, conformant panells de façana opacs o perforats, com en el cas de l'estadi Jean-Bouin, a París (figures 1, 2 i 3). Els panells, que mesuren 8 o 9 m de llarg, 2,5 m d'ample i 4,5 cm de gruix, segueixen un patró



Figura 2-16 Interior de l'estadi



Figura 2-17 Vista de la façana



Figura 2-18 Exterior de l'estadi

geomètric que recobreix 23.000 m² d'envolvent, inclosos 12.000 m² de coberta.

Corbes

Les formes corbes que es poden fer amb UHPC permeten dibuixar radis molt més petits del que es podria fer amb panells plans. En l'edifici «The Atrium», a Victoria (British Columbia) (figura 4), s'utilitzen panells curvats per a revestir la façana. Si s'hagués optat per panells plans, aquests haurien estat massa estrets i no s'hauria aconseguit l'efecte visual desitjat.



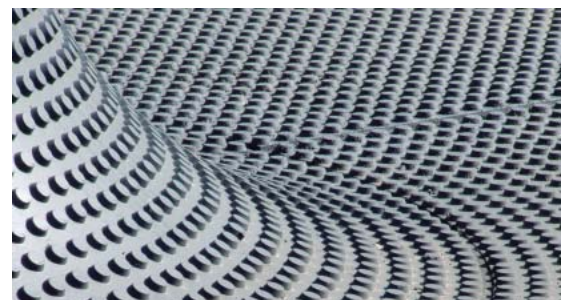
Figura 2-19 Façana de «The Atrium»

Textures

En moltes ocasions, l'aplicació d'UHPC per a revestiments implica invertir recursos econòmics i temps en estudiar textures, crear prototips i fabricar motlles per a assegurar el resultat final. L'estudi ECDM va dissenyar la seu de l'empresa de transport públic RATP a Thiais, França, i va crear un revestiment únic d'estil LEGO® amb peces de 30 mm de gruix, amb corbes per a unir.



Figura 2-20 Vista exterior



Detall de revestiment amb textura LEGO®.

Mobiliari

Amb UHPC es poden fabricar peces de mobiliari amb formes orgàniques i complexes i, alhora, lleugeres, llises i elegants, com les creades pel Bar Agricole, a San Francisco (figura 8). Són uns bancs, d'aproximadament 1,5 m x 1,5 m x 1,5 m, amb un gruix de 25,4 mm, amb angles molt ambiciosos i sense reforços estructurals.

També s'utilitza l'UHPC en panells decoratius que poden variar de 12 a 20 mm i en múltiples formats, colors, textures, malles i relleus.

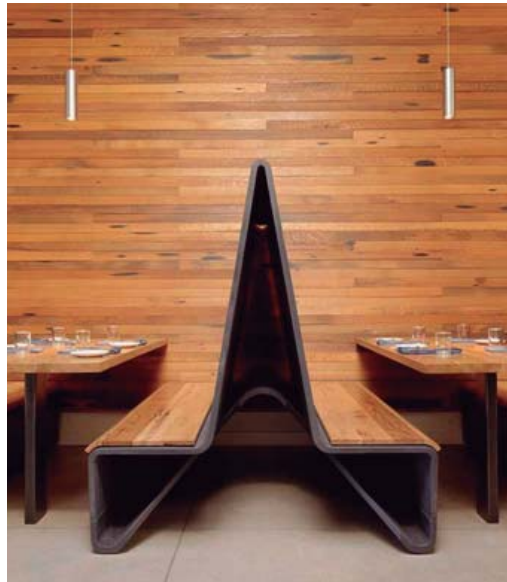


Figura 2-22 Banc del Bar Agricole, a San Francisco.

MuCEM

El Museu de les Civilitzacions a Europa i el Mediterrani (MuCEM), a Marsella, ha permès demostrar, de la mà dels arquitectes Rudy Ricciotti i Roland Carta, les qualitats arquitectòniques estructurals i arquitectòniques. L'UHPC es va utilitzar per a construir diverses parts de l'edifici: un pont de peatons de 78 m de llarg (fig. 2-20), l'estructura per a un cub de 15.000 m² de superfície, el paviment



Figura 2-23 Terrassa del MuCEM.

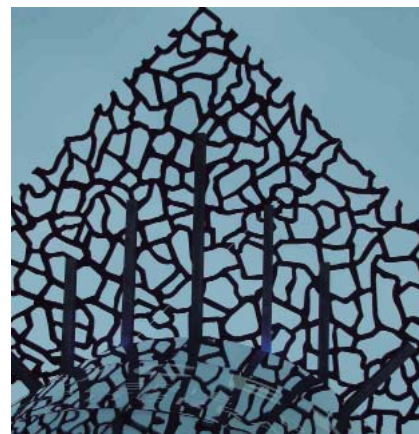


Figura 2-24 L'UHPC permet construir voladissos amb cantells molt prims.



Figura 2-25 Pont del MuCEM.

i l'envolvent (fig. 2-18 i 19) format per panells perforats i subjectats amb columnes amb forma «Y» i «N» creats a partir de 20 dissenys bàsics que permeten fins a 80 combinacions.

2.1.2 Elements estructurals

En obres d'enginyeria, com els ponts, l'UHPC és molt ben valorat gràcies a les seves prestacions mecàniques i les seves característiques com la porositat gairebé nul·la, que el fa resistent a la corrosió. Igual que amb els elements arquitectònics, l'ús d'UHPC en estructures permet construir geometries complexes, com closques, i és més adequat que el formigó convencional per a ambients agressius — per a la construcció de ponts.

Ponts

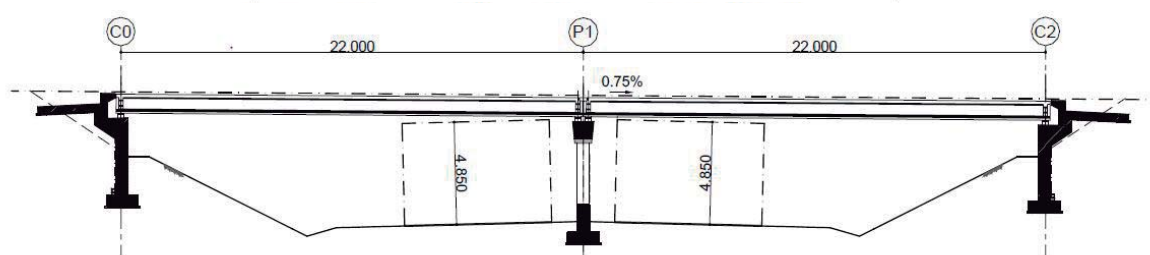


Figura 2-26 Fotografia del pont a Bourg-lès-Valence
Figura 2-27 Secció longitudinal

Els ponts són una de les construccions en què es pot demostrar el potencial de l'UHPC en el disseny de les peces prefabricades i en els requeriments estructurals. En el cas del pont a Bourg-lès-Valence (figures 1-12 i 1-13), el resultat va ser una estructura en dos trams, un de 20,50 m i l'altre de 22,50 m. L'alçada de les bigues és de 0,90 m (cantell equivalent de 0,25 m), amplada de 2,40 m cada biga i un gruix d'11 cm. Les fibres d'acer de la mescla feien 20 mm de longitud, 0,3 mm de diàmetre i una tensió admissible de 1200 MPa. No es va necessitar armadura passiva ni vibració.

En el cas del pont a Kassel, es va estudiar la possibilitat de fer els elements amb formigó armat, però l'UHPC oferia millors prestacions amb molt menys cost. La longitud és de 133,2 m repartits en 6 suports, en què la longitud màxima lliure és de 32 m. Està format per peces prefabricades de 5 m d'amplada i de 8 a 10 cm de gruix.

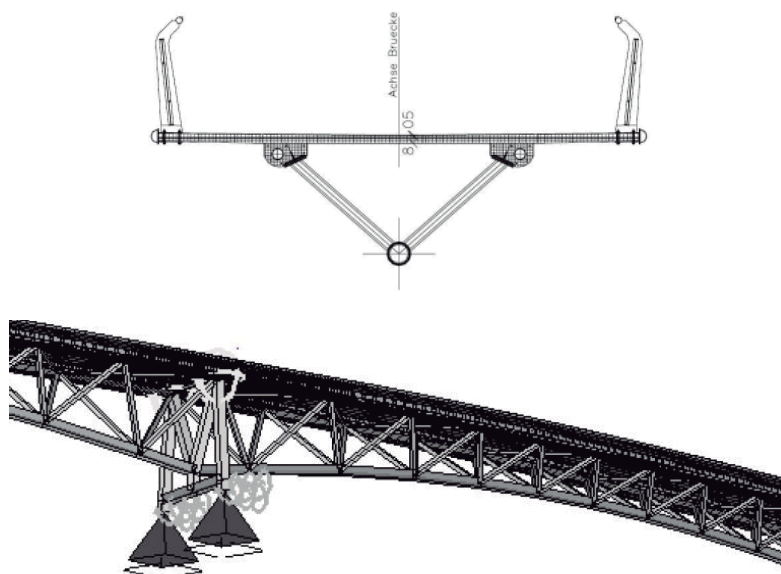


Figura 2-28 (esquerra) Secció transversal del pont del riu Fulda, a Kassel (Alemanya)
 Figura 2-29 (dreta) Model 3D: es mostren els suports i la geometria de l'estructura del pont.

Cúpules i closques

Tant les cúpules com les closques són elements de geometries estructuralment complexes ja que tots els seus elements són corbats. La cúpula representa una secció d'esfera mentre que la closca enllaça diferents sectors d'esfera de diferents radis. El seu anàlisi estructural és complicat si es fa de manera manual, però són estructures que s'han utilitzat en alguns edificis al llarg de la seva història.



Figura 2-30 Estructura per a una estació de servei (1968), dissenyada per Heinz Isler

La seva singularitat recau en la capacitat exclusiva de fer treballar el material a compressió, per això l'ús d'UHPC en aquest tipus d'estructures és adequat.

Les aplicacions en arquitectura són, sobretot, de caire estètic: és un material plàstic, molt dens i poc porós, que reproduïx bé gairebé qualsevol textura, i no tant per exigències estructurals. Tot i això, totes exploren de manera implícita, la capacitat resistent de l'UHPC, ja que permet gruixos molt petits.

2.2 Objectius del treball

En aquest treball s'exploraran les aplicacions de l'UHPC per a solucions estructurals i arquitectòniques, analitzant la relació entre els propis requeriments estructurals i la forma que adoptin el elements formats per aquest material. Els objectius a complir són els següents:

- Completar i aprofundir en el meu aprenentatge sobre anàlisi estructural mitjançant l'ús de mètodes analògics i programari informàtic.
- Analitzar una estructura de grans llums, posant èmfasi en els elements d'UHPC presents en l'estructura.
- Establir una relació entre l'estructura i la forma. Es pretén determinar la qualitat de la forma estudiada adoptant com a criteris comparatius la idoneïtat del tipus d'esforç respecte a les propietats del material que forma l'estructura, així com les condicions de contorn que se li assignen a l'estructura.
- Ajustar la forma mitjançant un procés matemàtic iterariu que involucra criteris d'optimització.

2.2.1 Estructura a analitzar

S'analitzarà l'estructura de la coberta d'un projecte per a l'estació de tren de Montpellier (Gare Montpellier Sud de France). La coberta és un element que cobreix tota l'amplada de les andanes i de l'estació. La proposta contempla la construcció de la coberta a partir d'unes jàsseres metàl·liques de 54 metres de llarg i 20 metres entre jàsseres. Per a cobrir les llums entre jàsseres s'utilitzen unes closques formades per uns elements prefabricats amb UHPC.



2.3 *Mètode de treball*

2.3.1 Anàlisi estructural

Per dur a terme l'anàlisi estructural de l'element d'UHPC, el primer que cal és definir una sèrie de factors importants, com el tipus d'esforç, el pes específic de la coberta, el tipus d'unions i la transmissió de càrregues. Es marcaran uns objectius concrets que haurà de complir aquesta peça, com les tensions màximes i mínimes i les deformacions, posant com a condició que la placa sigui monolítica (formada per un sol material, sense armadura).

2.3.2 Optimització de la forma

L'anàlisi inicial serà important perquè ens donarà pistes de les dimensions de la peça. Paral·lelament als successius anàlisis, es duran a terme a processos d'optimització estructural. A partir d'un primer anàlisi de la peça bàsica d'UHPC i de la definició matemàtica d'aquesta, es farà una valoració dels resultats obtinguts i es faran anàlisis iteratius modificant la geometria amb l'objectiu d'assolir uns valors d'esforç de compressió elevats i minimitzar els esforços de tracció.

També es valorarà que la forma general de les seccions siguin les adequades i com afecten les condicions de contorn a la peça.

2.3.3 Programari

Per a poder a dur a terme l'anàlisi i el procés d'optimització estructurals, s'utilitzaran dos programes informàtics.

- **SolidWorks:** programa per a disseny mecànic. Amb aquest programa es generarà la geometria de la peça.
- **ANSYS:** programa per a càlcul d'estructures. En aquest projecte s'utilitzaran els mòduls d'anàlisi d'estructures estàtiques i d'optimització en els entorns integrats DesignModeler (editor de geometria) i Mechanical (anàlisi estructural). En aquest programa se li introduiran les característiques mecàniques del material, la geometria elaborada

3 Gare de Montpellier

La primera estació de Montpellier, batejada també com Saint Roch, va ser construïda l'any 1844 en motiu de la línia entre Montpellier i Nîmes. Ha estat modificada en successives ampliacions amb el pas del temps per a poder absorbir la quantitat creixent d'usuaris. Ha estat també escenari de bombardeigs durant la Segona Guerra Mundial.

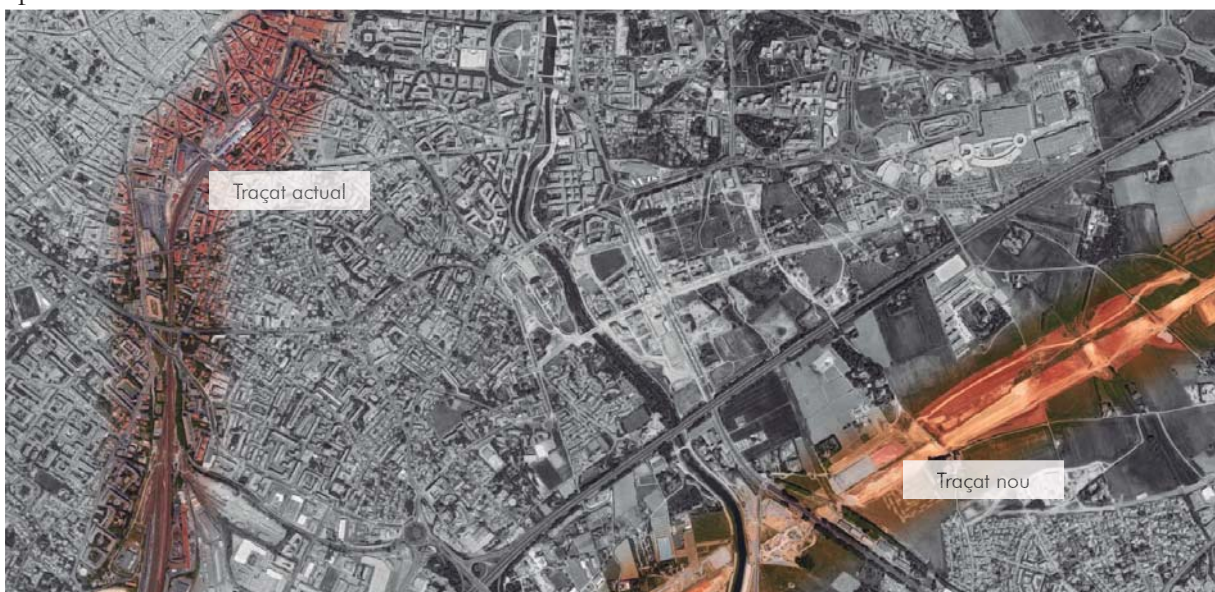
El 1980, amb l'arribada del TGV, l'estació va patir una reforma integral: la façana es va deixar intacta mentre que tot l'interior va ser derruït per poder construir un nou edifici de dimensions majors.



Figura 3-31 Estació de Montpellier Saint Roch.

El seu entorn també ha estat objecte de modificacions per a poder encabir altres transports públics, com els autobusos o el tranvia, que va ser introduït l'any 2000 a la ciutat.

Un projecte recent de la Société Nationale des Chemins de Fer Français, coneguda per les sigles SNCF, proposa un nou traçat de les vies, més recte, per la qual cosa l'estació haurà de ser traslladada. Aquesta nova estació, la Gare de Montpellier-Sud-de-France, es localitzarà en uns terrenys a aproximadament 3 km de l'actual estació.



3.1 Definició estructural de la coberta

L'estructura principal de la coberta (figures 3-11 a 3-13) està formada per 6 pòrtics metàl·lics de 54 m de llarg; 5 d'ells amb 3 punts de suport i un altre amb 7 punts de suport. Sobre aquests punts de suport hi recolzen jàsseres metàl·liques dissenyades específicament per aquesta estructura.



Figura 3-32 Vista aèria (virtual) de la nova estació.



Figura 3-33 Vista (virtual) a peu de carrer.



Figura 3-34 Vista interior (virtual)



Figura 3-35 Vista interior (virtual)

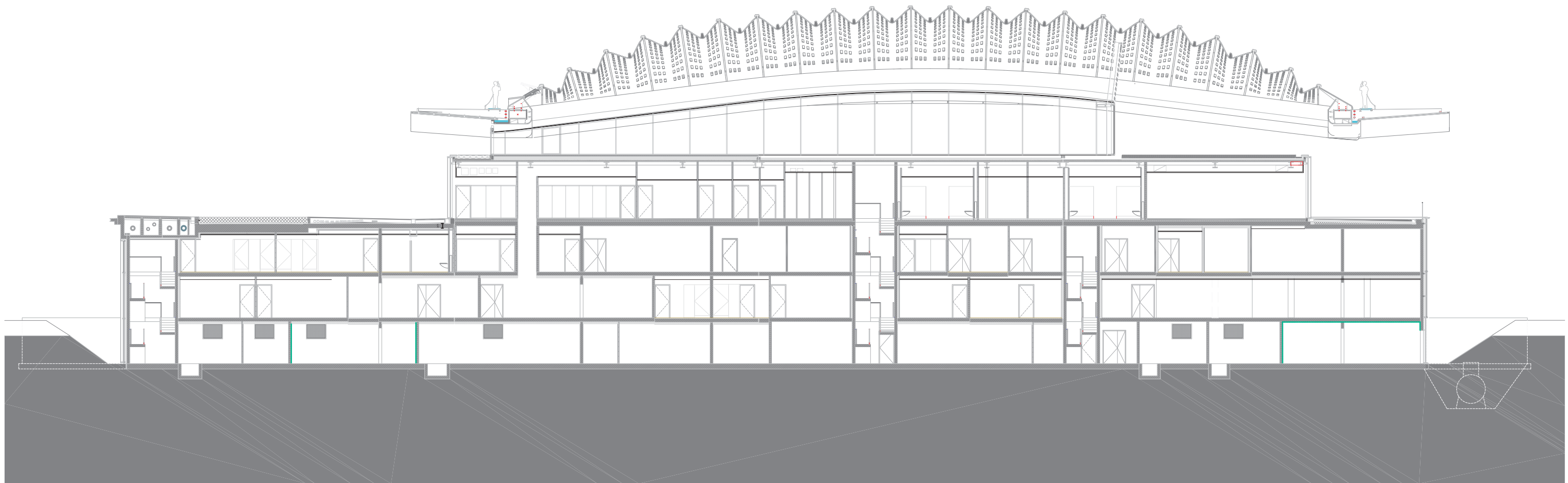


Figura 3-36 Secció transversal de l'estació.

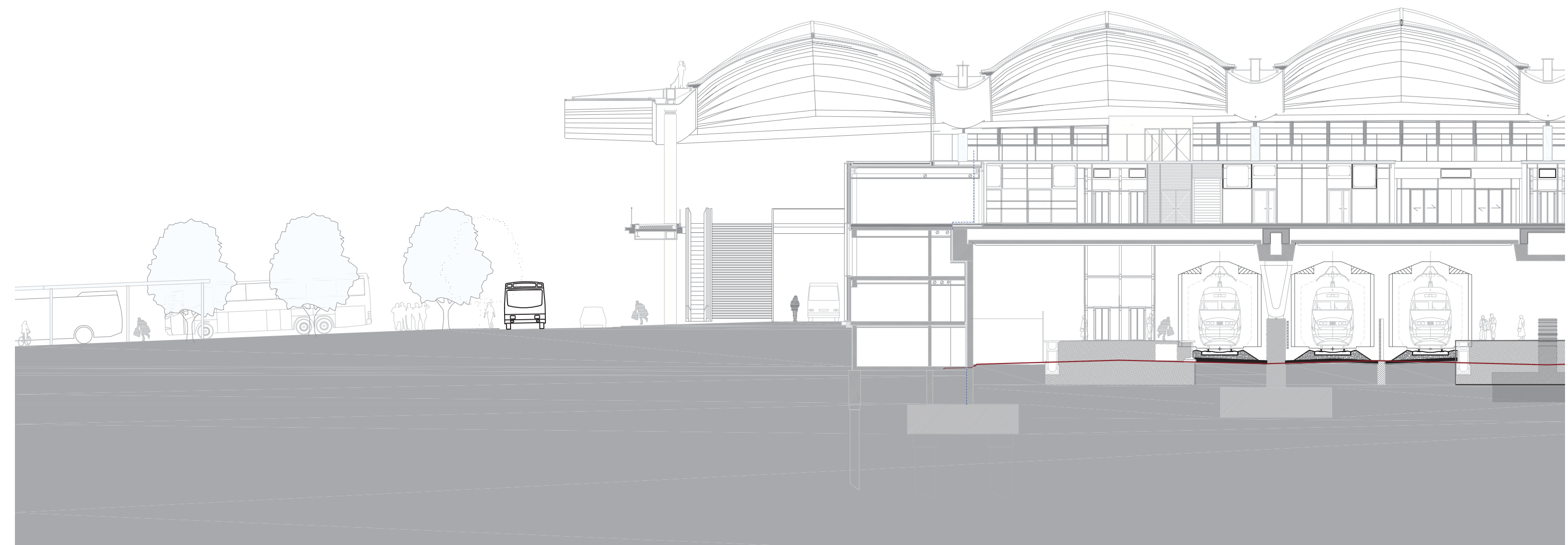
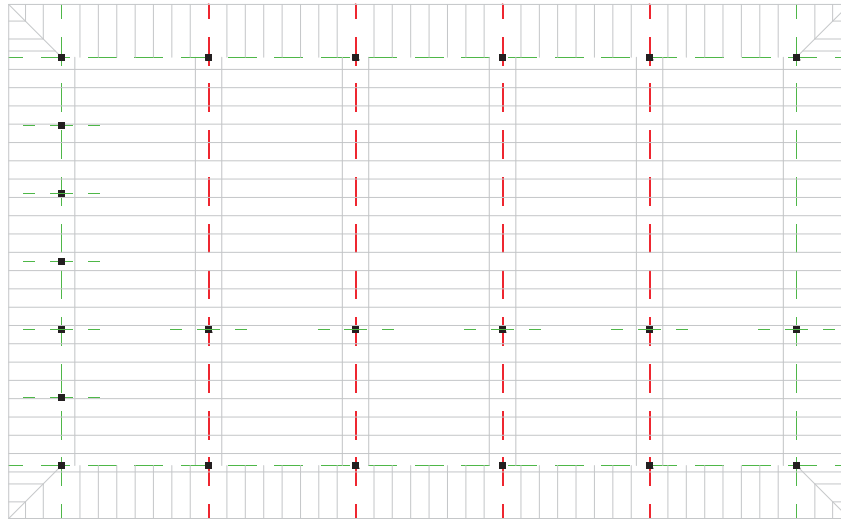


Figura 3-37 Secció longitudinal de l'estació.

3.1.1 Closca d'UHPC

Per a cobrir les llums entre els pòrtics metàl·lics s'ha pensat en utilitzar elements prefabricats d'UHPC autoportants (és a dir, configuren el forjat de la pròpia coberta sense necessitat d'estructures addicionals). Aquestes peces fan 17,10 m de llarg i 2,43 m d'amplada i es recolzen sobre mitjançant suports de neoprè tipus "D" unes ales soldades a banda i banda de les jàsseres principals. Aleshores, les diferents plaques d'UHPC van adquirint inclinació a mesura que s'acosten a les vores: la peça central té una inclinació de 0°. Segons el projecte, aquestes plaques tenen unes obertures que fan la funció de lluernaris.



Per a poder cobrir amb els 17 metres de llum entre jàsseres, aquest element d'UHPC haurà de te-

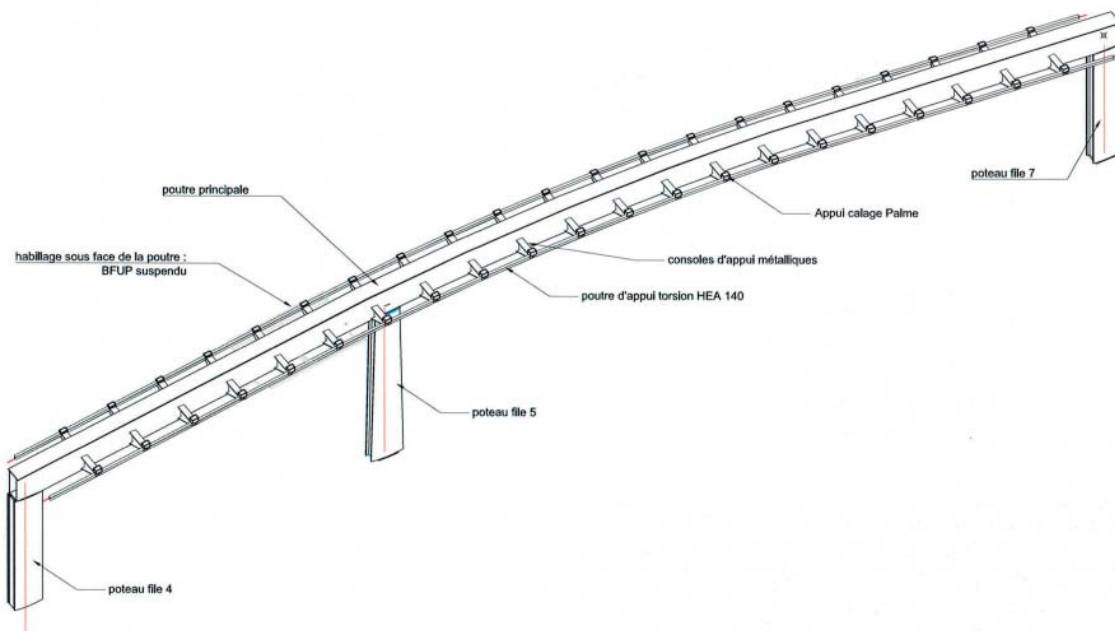


Figura 3-38 (a dalt) Planta de l'estructura.
Figura 3-39 (a sota) Pòrtic principal de l'estructura.

nir certa curvatura per poder reduir al màxim els esforços de flexió i convertir-los en esforços de compressió. Determinar la curvatura d'aquesta peça i el seu cantell és un dels objectius del procés d'optimització que es portarà a terme més endavant.

3.2 Discretització de l'estructura

Previ a l'anàlisi estructural de la coberta, cal definir els elements presents a la coberta, definir el material i la secció de cada element i classificar els diferents models estructurals mitjançant la definició dels punts de suport, elements finits i els tipus de càrrega. La taula 3 mostra, de menor a major, els diferents models estructurals, que són 4:

- Biga birecolzada amb suports d'un grau de llibertat (no permet desplaçaments verticals ni horitzontals).
- Biga contínua amb 3 punts de suport d'un grau de llibertat (no permet desplaçaments verticals ni horitzontals).

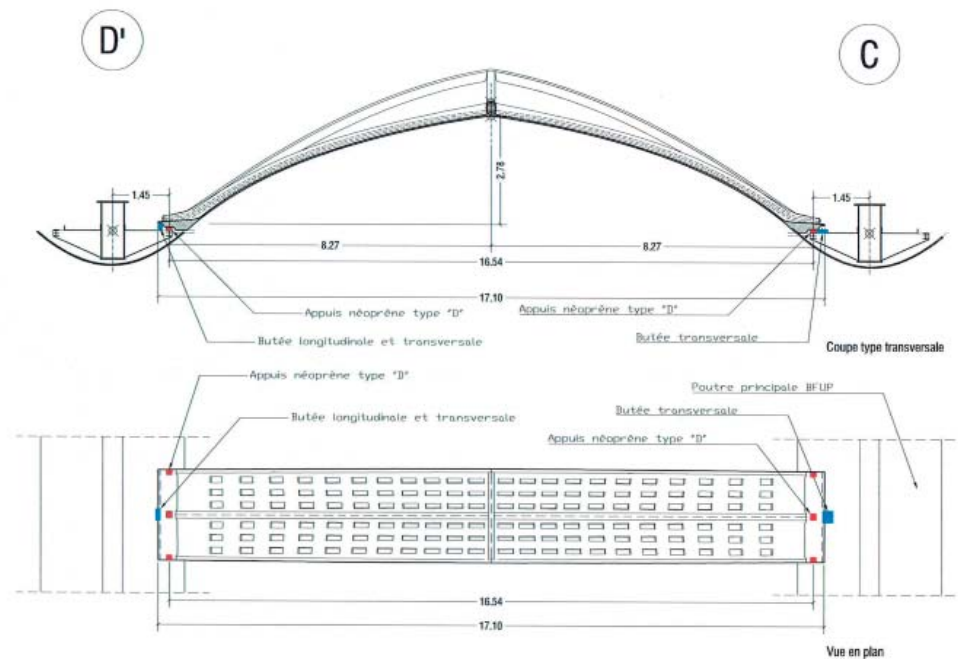


Figura 3-40 Secció longitudinal i planta d'una placa d'UHPC.

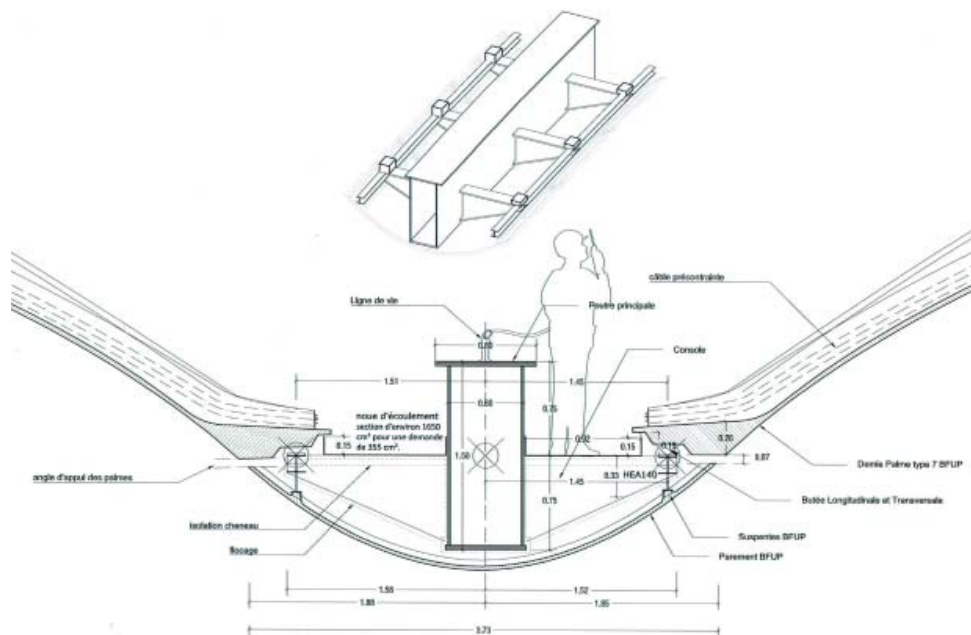


Figura 3-41 Detall de la secció longitudinal. Suport de les plaques d'UHPC a les jàsseres metàl·liques.

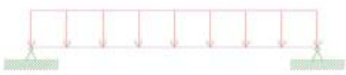


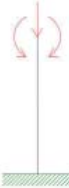
- Biga en voladís amb un extrem encastat i l'altre lliure.
- Pilar amb recolzament encastat i un extrem lliure.

3.2.1 (1a) Biga birecolzada: closca d'UHPC

És l'element singular. Cobreix tot l'interior de l'estació a partir de quedar recolzat cada panell a les jàsseres metàl·liques. A part del pes propi del formigó, les càrregues que se li apliquen són les pròpies d'una coberta: aïllament tèrmic, capes d'impermeabilització i acabat. Aquesta és la peça objecte d'estudi en aquest treball.

3.2.2 (1b) Biga en voladís: voladís de la coberta

És un element que recorre tot el perímetre de la coberta. La seva estructura són bigues metàl·liques de cantell variable.

	Element	Càrregues	Model
(1a)	Biga birecolzada	Pes propi Coberta	
(1b)	Biga en voladís		
(2)	Biga contínua	Pes propi $1a + 1b$	
(3)	Pilar	Pes propi $1a + 1b + 2$	

Taula 1. Taula d'elements estructurals en la coberta de la nova estació de Montpeller

3.2.3 (2) Biga contínua: jàssera metàl·lica

És l'element que recull tots els elements d'UHPC. N'hi ha de dos tipus:

- 4 jàsseres centrals
- Jàsseres perimetrals

3.2.4 (3) Pilar: pilar metàl·lic

Suporten les jàsseres metàl·liques i es disposen segons com està indicat en la figura.

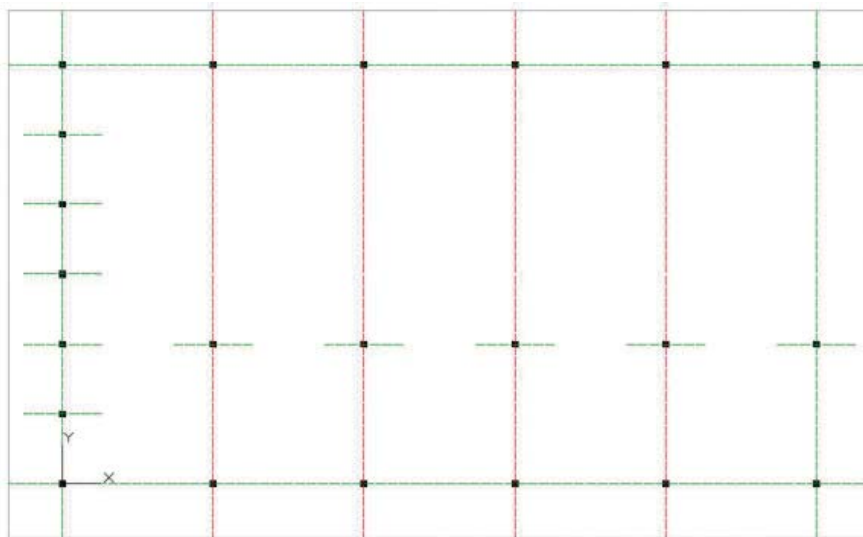


Figura 3-42 En verd, les jàsseres perimetrals. En vermell, les jàsseres centrals.

4 Característiques de l'UHPC

Com un material capdavanter en la investigació sobre el formigó, el formigó d'ultra altes prestacions – conegut per les seves sigles UHPC, ultra high performance concrete – ens proporciona una nova tecnologia per expandir la indústria de la prefabricació. La combinació de propietats superiors facilita l'aptitud per a dissenyar productes de poc gruix, formes complexes, corbes i textures personalitzades, abastant un terreny on el formigó tradicional no podia arribar.

L'UHPC permet una ampla varietat de composicions que permeten el seu ús en elements arquitectònics o estructurals. En el cas d'elements estructurals, amb reforç de fibres metàl·liques amb una alta presència de carboni, permet arribar a 200 MPa en esforços de compressió i a 20 MPa d'esforços de flexió.

L'UHPC arquitectònic, reforçat amb fibres d'alcohol de polivinil, adquireix resistències de 117 MPa a compressió i 20 MPa a flexió. Gràcies a aquestes prestacions, l'armadura passiva és gairebé o completament innecessària, i la seva fluïdesa permet reproduir la formes i textures amb molta precisió. Per això les seves aplicacions s'estenen més enllà dels propis elements estructurals i les obres d'enginyeria, com per exemple panells perforats per a façanes, mobiliari urbà, escales i paviment de gran format.

A part de les seves prestacions mecàniques, l'UHPC té nombrosos avantatges que redueixen el cost global, com la seva producció, la quantitat que es requereix per conformar peces, el seu manteniment o la velocitat de construcció.

4.1 Manipulació

Perquè l'UHPC assoleixi màximes prestacions, el control sobre la seva manipulació, i especialment un control precís sobre els materials (temperatura), la mescladora (velocitat) i el vessament.

Les característiques físiques de l'UHPC, com la viscositat i la presència de microfibrilles, exigeixen un treball acurat sobre els motlles que es fan servir per a conformar les peces. Per això els motlles són dissenyats amb precisió, i es tenen en compte aspectes com els agents antiadherents, el material del motlle¹, la orientació i el propi suport del motlle.

El formigó s'aboca lentament al motlle, per prevenir la presència d'aire a l'interior. No es permeten vibracions interiors, i només es permeten vibracions exteriors, de manera limitada, per ajudar a l'eliminació de bombolles d'aire — una vibració excessiva pot provocar que les fibres de PVA es desplacin a la superfície.

Les peces arquitectòniques arriben a les prestacions demanades passat el temps de curat i enduriment (75 MPa). Però si les peces tenen requeriments estructurals, es poden tractar tèrmicament un cop desemmotllades. Se sotmeten a 60 °C i un 95% d'humitat relativa durant 72 hores perquè assoleixin les màximes prestacions, a part d'adquirir també estabilitat dimensional.

Per a poder comercialitzar amb èxit elements prefabricats d'UHPC cal entendre les propietats tècni-

¹ Els següents materials han estat utilitzats satisfactòriament en la prefabricació d'elements d'UHPC: acer, silicona, policarbonat, poliuretà, Teflon, vidre i fusta pintada amb resines epoxi).

ques del material i, sobretot, cal aplicar-lo com a solucions a un problema que, alhora, requerirà una anàlisi econòmica. Al cap i a la fi, es tracta de comparar el producte amb diferents materials, però per això cal fer una comparació global que tingui en compte no només el preu, sinó tota la solució i, comparat amb la prefabricació amb metall o amb formigó convencional, l'UHPC — utilitzat de manera òptima — ofereix solucions d'altres prestacions, llarga vida útil i competitives en el mercat.

El cost global, que inclou el material, la producció, la distribució i el propi mercat, s'ha de considerar dins del preu total de la construcció. Si el comparem amb el formigó convencional, l'UHPC és més car (com a material) però el volum necessari és molt menor i proporciona majors beneficis i solucions eficients.

4.2 Economia de l'UHPC

En estudis de laboratori s'han demostrat, a part de les prestacions mecàniques de l'UHPC, les millores qualitatives i quantitatives en relació al cost de l'UHPC en comparació amb altres formigons de menors prestacions — per l'estudi s'han utilitzat els formigons de classes C40/50, C80/95 i C180. L'estudi diferencia dos blocs: l'ús de matèries primeres i l'energia consumida, i ha consistit en modelar un pilar de 3,50 m perquè suporti una càrrega de 40 MN.

En la següent taula es resumeixen els resultats obtinguts en l'anàlisi estructural del pilar:

Malgrat que el metre cúbic de formigó C180 (UHPC) consumeixi més matèries primeres — és més dens, conté fibres i cal més energia per a produir-lo — les bones característiques mecàniques permeten reduir la quantitat de formigó utilitzar per a una mateixa càrrega en un 56 % el volum que caldria amb un formigó de classe C40/50, i també reduir la quantitat d'armadura necessària en aquest pilar, de 64Ø28 a 28Ø28.

El consum d'energia i matèries primeres disminueix com més altes són les prestacions mecàniques del formigó (figura 4-43). Entre el C 80/95 i el C 180, a més, el consum d'energia és molt semblant — en el C 180 és lleugerament menor — i per tant l'UHPC proporciona més eficiència tant en

Classe de formigó		C 40/50	C 80/95	C 180
Àrea de la secció del pilar	m ²	1,0	0,67	0,44
Volum de formigó	m ³	3,360	2,258	1,464
Àrea de l'armadura	cm ²	400	270	174
Volum d'armadura	m ³	0,140	0,095	0,061
Massa d'armadura	to	1,08	0,74	0,47
Energia consumida				
Formigó	MJ	6,693	5,701	8,616
Armadura d'acer	MJ	11,745	8,048	5,111
Total	MJ	18,438	13,749	13,727
Consum de matèries primeres				
Formigó	to	8,13	5,37	5,71
Armadura d'acer	to	6,91	4,74	3,01
Total	to	15,04	10,11	8,72

Taula 2. Consum d'energia i matèries primeres per a un pilar de formigó armat segons la classe estructural del formigó ($N_{ed}=40$ MN, $l = 3,50$ m)

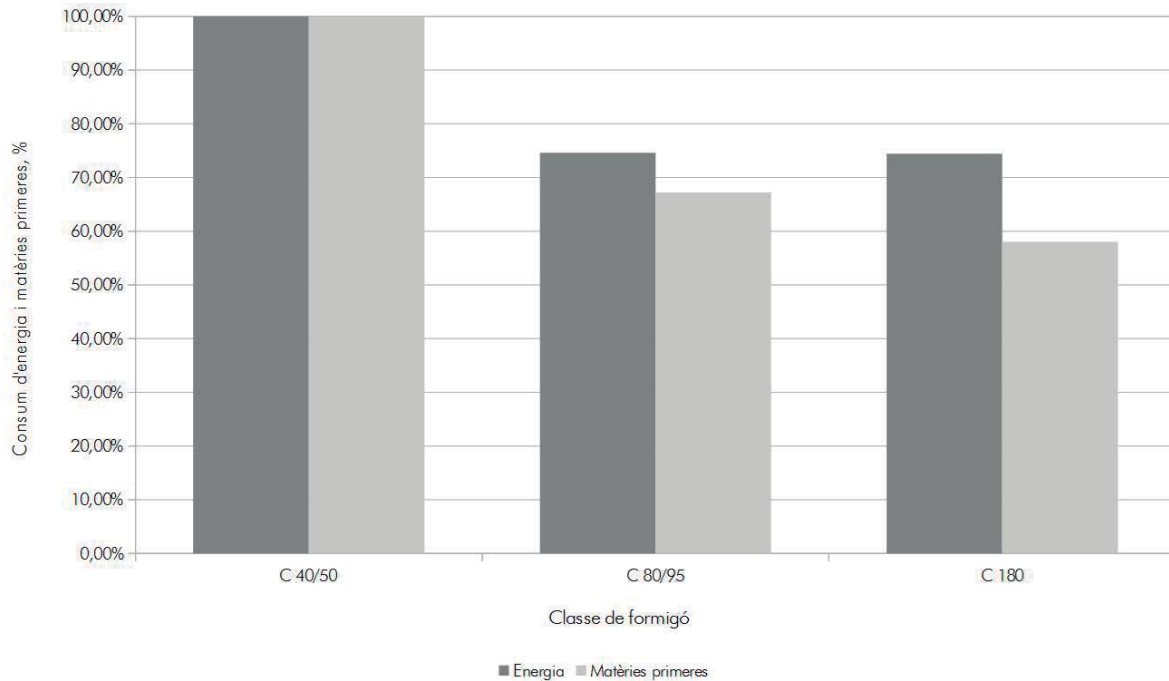


Figura 4-43 Consum d'energia i matèries primeres per classe de formigó ($N_{ed} = 40 \text{ MN}$, $l = 3,5 \text{ m}$).

el cost de producció com en la vida útil de l'edifici, ja que les seccions utilitzades per a la mateixa càrrega són més petites i la superfície útil de l'espai augmenta.

4.3 Sostenibilitat

Les característiques físiques i químiques de l'UHPC ens mostren bona resistència a les gelades i a productes antiglaç, presenten un menor ritme de carbonització i millor resistència als clorurs (productes àcids) comparat amb formigons de classe normal i d'alta resistència. Per això es pot assegurar que l'UHPC requerirà, comparativament, menys manteniment i menys cost de reparació en el futur.

Per a poder comercialitzar amb èxit elements prefabricats d'UHPC cal entendre, doncs, les propietats tècniques del material i, sobretot, cap aplicar-ho com a solucions a un problema que, alhora, requerirà una anàlisi econòmica. Al cap i a la fi, es tracta de comparar el producte amb diferents materials, però per això cal fer una comparació global que tingui en compte no només el preu, sinó tota la solució i, comparat amb la prefabricació amb metall o amb formigó convencional, l'UHPC — utilitzat de manera òptima — ofereix solucions d'altres prestacions, llarga vida útil i competitives en el mercat.

El cost global, que inclou el material, la producció, la distribució i el propi mercat, s'ha de considerar dins del preu total de la construcció. Si el comparem amb el formigó convencional, l'UHPC és més car (com a material) però el volum necessari és molt menor i proporciona majors beneficis i solucions eficients.

4.4 Components

L'UHPC es caracteritza per tenir una relació aigua/ciment baixa — de l'entorn de 0,2. Els quatre components principals són els següents:

		quantitat	relació amb aigua
Ciment		700 - 900	A/C \approx 0,2
Aigua	kg·m ⁻³	150 - 200	
Fibres		75 - 400	
Superplastificant		25 - 55	S/A \approx 0,2

Taula 3. Taula de quantitats de referència en la composició de formigó d'ultra altes prestacions.

Al contrari que el formigó, els àrids que s'afegeixen a l'UHPC estan formats per micropartícules de diferents minerals. En general, s'utilitzen dos tipus d'àrids: micropartícules de quars de diàmetres que varien dels 9 μ m als 7 mm, segons les especificacions de cada projecte, i fum de sílice d'una puresa igual o major al 85 % i en quantitats a l'entorn del 25 % de la massa de ciment.

4.5 Propietats mecàniques

L'UHPC, com que es tracta d'un material relativament nou, ha estat sotmès a diferents assaigs i experiments per a determinar les seves propietats mecàniques i els esforços a què pot estar sotmès. Per això, les dades que s'exposaran a continuació provenen dels assaigs² de diferents productes d'UHPC realitzats per diferents empreses i per a diferents finalitats.

4.5.1 Esforços de compressió

És la propietat característica del formigó. En diferents assaigs s'ha comprovat l'alta resistència a la compressió de l'UHPC amb diferents composicions.

En els diferents assaigs s'han determinat resistències a la compressió de l'ordre de 200 MPa. De fet, la resistència als 2 dies de curat és d'un 60% de la resistència màxima, i passats 7 dies, del 80%, com es mostra al gràfic de la figura 1-2, resultat d'assaig amb UHPC CERACEM³.

Una dels factors més importants en l'elaboració de l'UHPC és la relació entre aigua i ciment, de manera que com més baix és aquesta relació, millors prestacions adquireix el formigó. També s'han fet assaigs amb diferents quantitats relatives d'additius minerals, en especial amb fum de sílice. El fum de sílice és un producte de diòxid de silici amorf compost per micropartícules que actua com un element aglutinant en la mescla de l'UHPC. En una proporció adequada, seguint les dades de la figura 1-3, de l'entorn del 25% de la massa de ciment, el fum de sílice contribueix en millorar la resistència a la compressió fins

² Els assaigs es realitzen amb dos tipus de provetes: una de petita, de 16 · 16 · 40 cm³, i una de més gran de 15 · 15 · 70 cm³, segons la normativa de cada país.

³ CERACEM, producte d'UHPC fabricat per les empreses Eiffage i Sika, amb una proporció determinada de materials: premescla de ciment, 2.355 kg·m⁻³; superplastificant policarboxílic, 44,6 kg·m⁻³; aigua, 195 kg·m⁻³ (relació aigua/ciment = 0,22); fibres metàl·liques IFT Unoloc 20/0,3, 195 kg·m⁻³.

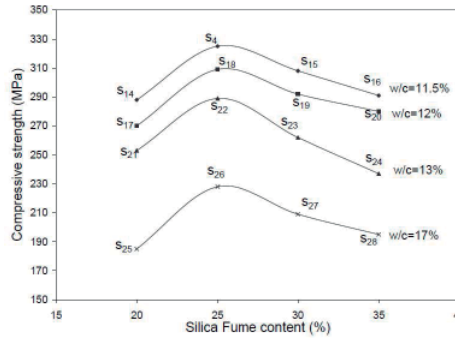
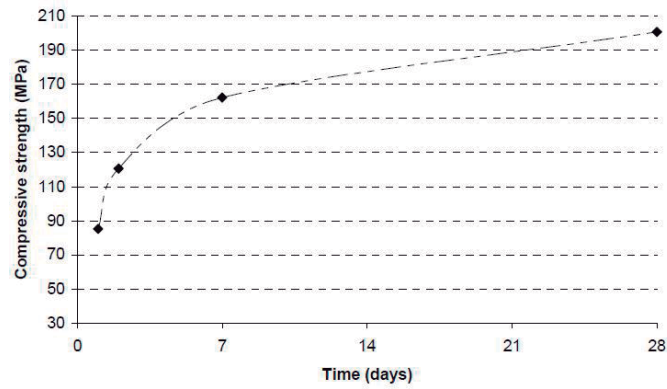
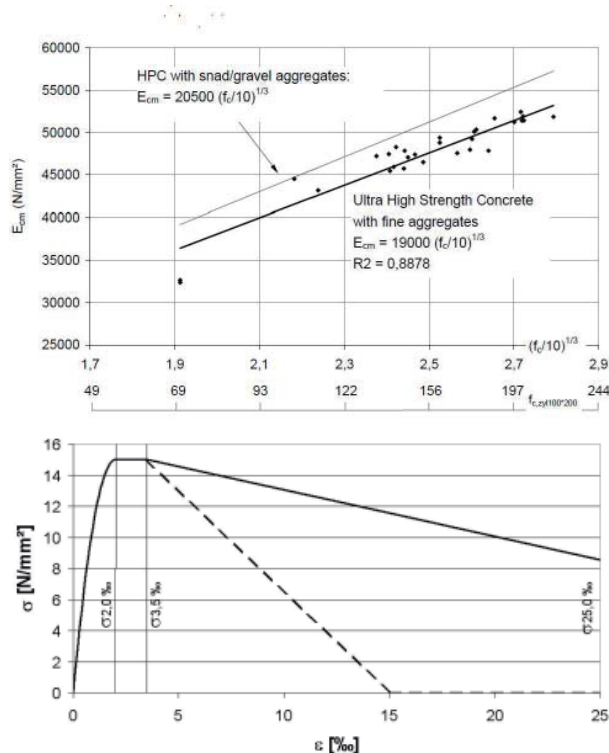


Figura 4-44 (a dalt)
Figura 4-45 (a baix)

4.5.2 Esforços de flexió

Els resultats obtinguts en assaigs amb diferents composicions en la mescla són valors superiors a formigons convencionals. En alguns casos, com en l'assaig realitzat amb UHPC CERACEM, sobrepassen els 30 MPa en el límit plàstic. No obstant, en un altre assaig els resultats no són tan



Als gràfics superiors es mostren els resultats de diferents assaigs amb UHPC:
Figura 4-46 (a dalt) Gràfic de deformació-tensió d'un assaig d'UHPC amb fibres d'acer.
Figura 4-47 (a baix) Relació entre la resistència a la compressió i el mòdul de Young.

optimistes, malgrat que segueixin essent superiors a formigons convencionals.

Les fibres metàl·liques que contribueixen en millorar de manera substancial la resistència a la flexió. Aquestes fibres s'afegeixen durant el procés de mesclat del formigó, per la qual cosa la fase de vessament de l'UHPC als motlles adquireix molta importància ja que influeix en la orientació de les fibres. També és convenient no vibrar excessivament el formigó ja que podria provocar desplaçaments de les fibres i fer que el producte no fos homogeni. A la figura 4-48 s'hi pot observar com l'angle d'orientació de les fibres afecta directament a la resistència a la flexió: l'angle òptim és de 90° entre la càrrega i l'orientació de les fibres.

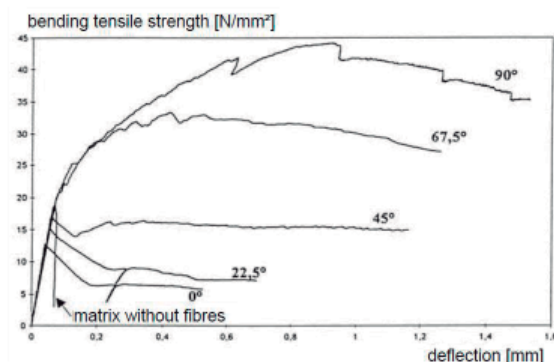


Figura 4-48

4.5.3 Curat i tractament de l'UHPC a altes temperatures

El procés de curat de l'UHPC és determinant per a les seves prestacions mecàniques. Sota unes condicions adequades d'humitat i temperatura, l'UHPC adquireix resistències a esforços de compressió d'uns 200 MPa als 28 dies. A part del curat, les peces d'UHPC es poden sotmetre a tractaments posteriors un cop són desenmotllades. Els elements s'exposen a 60°C i 95% d'humitat relativa durant 72 hores per permetre que l'UHPC assoleixi les màximes prestacions mecàniques, a part que també adquireix estabilitat estructural.

4.5.4 Resistència al foc

Elements estructurals necessiten complir uns requisits de seguretat de manera que la integritat estructural estigui garantida. S'han realitzat assaigs de resistència al foc amb diferents casos i composicions. En els resultats obtinguts s'ha comprovat que les provetes que contenen fibres de poli-propilè (fibres PP) o una mescla de fibres PP i d'acer tenen un comportament millor i mantenen la seva forma sense que la superfície es degradi.

4.6 Característiques físiques

L'UHPC també destaca pel seu comportament davant d'agents externs. La presència d'àrids fins o molt fins (de mides de l'ordre de 10^{-6} m fins a uns 7 mm) dona a l'UHPC una consistència concreta.

4.6.1 Porositat

En alguns assaigs amb UHPC s'ha estudiat el grau d'adsorció del material. L'adsorció és la capacitat d'un material per atrapar partícules en la seva superfície. Malgrat que una superfície sigui aparentment llisa, les partícules formen relleu. Com més grans són les partícules, més relleu formaran i, per tant, la superfície de contacte amb l'aire serà més gran.

Per la composició del formigó, i amb els resultats de l'assaig que es mostren a la figura 4-49,

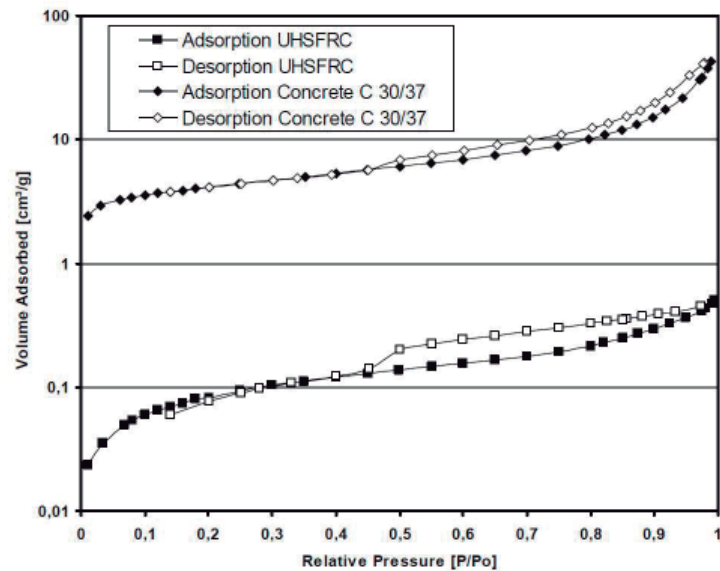


Figura 4-49 El volum adsorbit per l'UHPC és de fins a 100 vegades més petit que amb formigons convencionals.

4.7 Comparació de l'UHPC amb altres formigons

És important é valorar l'ús de l'UHPC en comparació amb altres formigons o amb l'acer. La taula 4 mostra un resum de les característiques físiques, químiques i mecàniques de diferents formigons i de l'acer d'alta qualitat, i ens indiquen resultats de laboratori. Per a més endavant, en la fase d'anàlisi, es tindrà present la normativa de la Association Française de Génie Civil (Associació Francesa d'Enginyeria Civil; en endavant, AFGC), on apliquen els corresponents factors de seguretat.

Propietats (característiques)	Formigó	HPC	UHPC	HRUHPC	Acer d'alta qualitat
Resistència a compressió, MPa	20 - 40	80	120 - 400	160 - 400	
Resistència a tracció, MPa	2 - 5	5	6 - 30	10 - 30	500
Resistència a flexió, MPa	3 - 5			100 - 400	600
Resistència a tallant, MPa	6 - 17			15 - 150	
Densitat, kg·m ⁻³	2.240 - 2.400	2.500	2.500 - 3.200	3.000 - 4.000	7.800
Mòdul de Young, GPa	14 - 41	50	60 - 100	60 - 100	210
Energia de trencament, J		150	150 - 1.500	4.000 - 5.000	2·10 ⁵
Força específica, N·m·kg ⁻¹				3·10 ⁴ - 10 ⁵	7,7·10 ⁴
Rigidesa específica, m ² ·s ⁻²				2·10 ⁷ - 3·10 ⁷	2,7·10 ⁷
Resistència al glaç	Moderada/ bona	Moderada/ bona	Excel·lent	Excel·lent	
Resistència a la corrosió	Moderada/ bona	Moderada/ bona	Excel·lent, fins i tot en gruixos de 5 - 10 mm	Excel·lent, fins i tot en gruixos de 5 - 10 mm	Baixa

Taula 4. Característiques mecàniques principals del HPC (formigó d'altres prestacions), UHPC (formigó d'ultra altres prestacions), HRUHPC (UHPC amb grans quantitats de reforç estructurals en fibres, armadura o cables) i acer d'alta qualitat.

5 Anàlisi estructural

Per a dur a terme l'anàlisi estructural he aplicat diverses recomanacions que dona la normativa de la AFGC, que s'aniran detallant a mesura que sigui necessari.

5.1 Condicions inicials

5.1.1 Estat de càrregues

Les càrregues aplicades a l'element d'UHPC estan resumides en la següent taula¹.

Tipus	Origen de la càrrega	Valor, MPa	Descripció
Permanent	Pes propi		Depèn de les dimensions de la peça. Densitat: $2486 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	Aïllament tèrmic	$3,925\cdot 10^{-5}$	Poliuretà de $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Capa de 10 cm de gruix.
	Impermeabilització	$3,925\cdot 10^{-5}$	Làmina impermeabilitzant de $4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
	Acabat de coberta	$4,907\cdot 10^{-5}$	Làmina de $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$
Variable	Neu	$0,55\cdot 10^{-3}$ $1,35\cdot 10^{-3}$	- Montpellier, Departament de Hérault. Zona climàtica 2B

Taula 5. Estat de càrregues: tipus, origen i valor de les càrregues que actuen sobre l'element d'UHPC.

Per a la càrrega permanent prenem el pes propi de la peça inicial, és a dir, la que té les dimensions especificades als plànols abans de fer-ne l'anàlisi estructural. En el cas de la càrrega de seu, prenem la més desfavorable. El programa d'anàlisi ANSYS s'encarregarà de calcular-ho i aplicar-lo.

5.1.2 Condicions de contorn

Es considera la placa d'UHPC com una biga birecolzada.

5.1.3 Composició del formigó

Les característiques mecàniques de l'UHPC depenen de la proporció en què cada material es combina en la mescla. Per exemple, la relació aigua-ciment ha de ser 1:5 aproximadament, tot i que també es controla la proporció entre ciment i els àrids, la quantitat d'additius i de fibres.

¹ Per la càrrega de neu s'ha pres l'establerta en la norma UNE-ENV 1991-2-3 Març 1998, basada en les dades publicades a l'Eurocodi sobre càrregues de neu.

Unes quantitats estàndard són les següents:

Component		Rerefència
Ciment	kg·m ⁻³	1000
Addició activa	kg·m ⁻³	150
Sorra 1, 0-0,8 mm	kg·m ⁻³	610,1
Sorra 2, 0,8-2 mm	kg·m ⁻³	406,8
Superplastificant	kg·m ⁻³	34,5
Aigua	kg·m ⁻³	201,2
Fibra 1	kg·m ⁻³	78,1
Fibra 2	kg·m ⁻³	78,1

Relació A/C	0,201
Volum de fins	50 %

Taula 6. (dalt) Quantitat de material en la mescla d'UHPC.

Taula 7. (baix) Proporcions dels diferents materials.

5.2 Estats límit i combinacions de càrregues

Les limitacions en els resultats dels anàlisis seran determinats per un conjunt de limitacions: per una banda, els estats límit últims (ELU), on es té en compte la integritat del material per evitar el colapse; i per altra, els estats límit de servei (ELS), en què es té present la deformació de la biga.

5.2.1 Estats límit últims

Els ELU ens determinen la magnitud d'una variable tal que, de ser sobrepassada, l'estructura podria colapsar. Per això, es contemplen factors de seguretat que s'apliquen a les resistències característiques del material. En el cas de la resistència a la compressió, la reducció ve donada per l'expressió:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_w \cdot f_{ck}}{\gamma_c}$$

on:

$$\gamma_c = 1,3 \text{ (per a càrregues permanents)}$$

$$\gamma_c = 1,05 \text{ (per a càrregues accidentals)}$$

$$\alpha_w = 0,85$$

5.2.2 Estats límit de servei

La deformació màxima de la biga ve determinada per l'expressió² següent:

$$\delta_{\max} = \left\{ \frac{l}{250}, \frac{l}{500} + 1 \right\}; l \text{ és la longitud entre suports}$$

2 Aquesta expressió està recollida en la norma espanyola EHE-08 (revisada el 2011).

5.2.3 Combinació de càrregues

La normativa també obliga a augmentar els efectes de les càrregues mitjançant combinacions de càrregues. En aquest cas només existeix una combinació de càrregues, ja que només hi ha una càrrega variable. Els efectes de les càrregues permanents es multiplicaran per 1,35; i els de les càrregues variables, per 1,50.

5.3 Geometria i anàlisi: introducció a l'entorn ANSYS

L'objecte d'estudi de l'anàlisi estructural és la peça d'UHPC que conforma la coberta de la nova estació. Per la manca d'informació sobre la peça obtinguda dels documents gràfics, les dimensions utilitzades en el primer anàlisi són aproximades.

Per tal de simplificar el procés d'anàlisi com el de disseny de la biga, he pres certes consideracions prèvies.

- He obviat les claraboies que estan grafiades als plànols originals per tal d'obtenir una peça



Figura 5-50 Imatge 3D de la biga d'UHPC

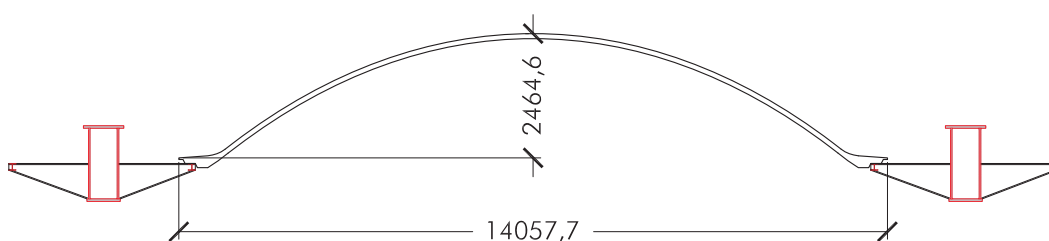


Figura 5-51 Vista frontal acotada de la biga d'UHPC i secció de les jàsseres principals. Amplada: 2.340 mm.

tipus. Les claraboies s'hi inseriran un cop fet l'anàlisi final, ja que serà aquest anàlisi el que ens donarà informació sobre els punts òptims on es poden fer forats.

5.3.1 Primer cas d'anàlisi: peça amb curvatura en la direcció transversal

Pel primer anàlisi s'utilitzarà una geometria senzilla: una biga d'UHPC en forma d'arc en la direcció longitudinal.

El software que utilitzarem permet controlar de manera matemàtica la forma de la biga. Per co-

mençar he fet el disseny de dues bigues que, malgrat siguin iguals, són lleugerament diferents: la circumferència i la catenària. Coneixent els extrems de la biga, les corbes de les plaques queden definides per les equacions 1 i 2.

Catenària (1)

$$y(x) = 0,5b \left(e^{\frac{x}{b}} + e^{-\frac{x}{b}} \right), x \in [-6.111, 6.111], b = 8.500$$

Circumferència (2)

$$y(x) = \sqrt{r^2 - x^2}, x \in [-6111, 6111]; r = 10.000$$

També es podria provar amb altres corbes còniques, com la paràbola i la hipèrbola. Tot i això, la raó per la qual les he triat es troba en l'ús històric d'aquestes formes.

- La circumferència és la geometria amb què les antigues civilitzacions, així com els grecs i els romans i els posteriors moviments clàssics, donaven forma als seus elements estructurals mitjançant arcs, voltes i cúpules. És molt fàcil de construir ja que requereix de construccions de suport auxiliars, com els contraforts, però és poc eficient.
- La catenària és la forma natural que adopta una cadena o un fil quan queda penjat dels seus dos extrems. La corba de descriu depèn només de les tensions que es generen a causa del pes de l'element, de manera que la trajectòria és òptima per a suportar el propi pes. Gaudí la va utilitzar col·locada de forma invertida — és a dir, com a arc catenari — com un recurs asidu en els seus edificis. És més difícil de construir, però és més estable.

Amb les dades introduïdes al software obtenim els següents resultats:

- Malgrat que la peça suportaria bé l'esforç de compressió, està molt lluny de complir amb les exigències a tracció.
- Tampoc compleix els estats límits de servei, que supera en un 1000%.

Esforç		Posició		Valor de disseny
Normal	MPa	σ_{fc}	64,32	80
		σ_{ft}	66,87	8
Deformació				
Eix y (vertical)	mm	Centre	-468	-29,8

Taula 8. Resultat de l'anàlisi amb ANSYS.

- Tot i que la peça és corbada en la direcció longitudinal, no té suficient moment d'inèrcia per a suportar les càrregues. Cal donar-li més cantell a la placa mitjançant la definició d'una geometria més adequada.

5.4 Segon anàlisi

El segon anàlisi realitzat es fa duent a terme una primera optimització de la secció tipus de la biga, de manera manual, tenint en compte els següents criteris.

- El moment d'inèrcia és la característica que s'oposa a la flexió d'una peça. És proporcional al cub de l'alçada, per això la secció de la peça haurà d'adquirir alçada sense incrementar de manera exagerada la superfície de la secció.
- Les traccions es localitzen a la part inferior de la secció; les compressions, a la part superior. La resistència a la compressió és de l'ordre de 10 vegades major que a la tracció, per la qual cosa la part superior de la secció pot contenir menor quantitat de material. De la mateixa manera, interessa que la part inferior de la biga (inferior al seu centre de gravetat) tingui suficient quantitat de material per a suportar les traccions.

La figura 5-52 mostra la secció tipus que es proposa pel projecte de la nova estació de Montpellier, que destaca pels gruixos petits de les ales de la placa.

Amb el mateix estat de càrregues, els resultats dels anàlisis es mostren el la següent taula:

- Es compleixen dos dels tres requisits: resistència a la compressió i la deformació vertical màxima.

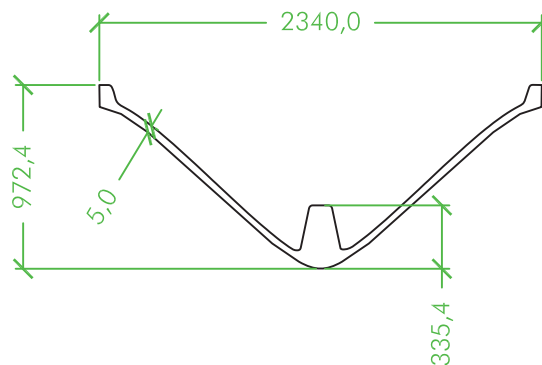


Figura 5-52 Biga amb secció optimitzada.

- L'esforç de tracció segueix essent superior que el valor de disseny.
- Les tres característiques han patit un descens notable comparat amb la biga del primer anàlisi, i ens confirma les hipòtesis anteriors.
- Les traccions encara tenen valors massa elevats, per la qual cosa és necessari seguir treballant sobre la secció de la peça i modificar-la.

Esforç		Posició		Valor de disseny
Normal	MPa	σ_{fc}	27,81	80
		σ_{ft}	27,41	8
Deformació				
Eix y (vertical)	mm	Centre	-59,0	-29,8

Taula 9. Resultat del segon anàlisi amb ANSYS.

6 Optimització

L'optimització és un procés amb el qual s'assoleix un objectiu establint uns valors d'entrada (input) i de sortida (output). Els mecanismes que es poden utilitzar per a optimitzar una funció són dos: un mètode basat en el càlcul, i un altre mitjançant la modificació iterativa de paràmetres. Per a ambdòs casos és necessari establir els paràmetres de què depèn la funció objectiu. I en el primer cas, és imprescindible definir aquesta funció objectiu com a funció de tots els paràmetres establerts. L'altre mètode es basa en la repetició dels mateixos càlculs variant els paràmetres en cada un. És un mètode més lent però igual d'eficaç.

En el cas de voler-ho fer de manera analítica, utilitzant expressions matemàtiques, és imprescindible definir les funcions que descriuen el comportament dels valors objectiu. Aquest mètode seria assequible en el cas de tenir una biga d'una secció senzilla i contínua en tota la longitud de la biga, per exemple una de circular o de rectangular, ja que d'aquestes seccions es coneixen les equacions generals per a cada esforç i per a la deformació vertical. No obstant, la geometria de la placa d'UHPC que ens ocupa és complexa i, a més, de secció variable, amb una alçada d'1 m en la part central i de l'ordre de 20 cm als extrems.

Tot i que seria possible definir les equacions, suposaria invertir-hi molt de temps. Per això, i com que la geometria s'ha de generar amb programes informàtics, utilitzarem el mòdul d'optimització d'ANSYS per a dur a terme aquest procés. En el cas de l'optimització de la peça d'UHPC, l'objectiu és complir amb les exigències de seguretat establertes en els estats límit amb el mínim material possible.

6.1 Què significa optimitzar?

Optimitzar significa trobar el valor mínim o màxim d'una funció, segons l'objectiu marcat, que depèn d'una sèrie de paràmetres i que té unes restriccions que condicionen aquests valors. Aquests tres conceptes — funció objectiu, variables de disseny i restriccions — formen un cicle tancat, de manera que el procés d'optimització comença quan es defineixen.

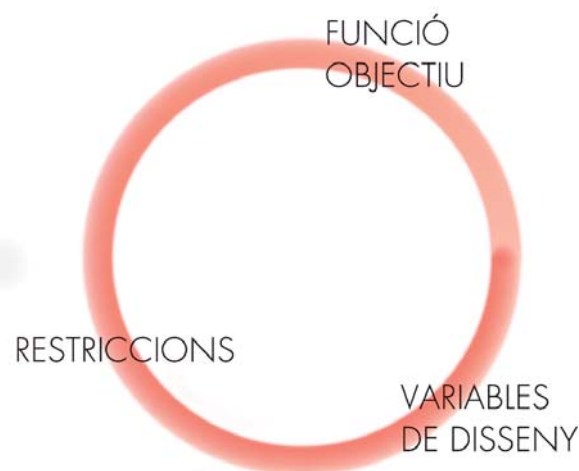


Figura 6-53 Què és un problema d'optimització?

- **Funció objectiu:** és la funció que ens calcula el valor que ens interessa estudiar, de la qual volem conèixer-ne el seu comportament i optimitzar-la.
- **Variables de disseny:** són cada una de les dades, que utilitzem com paràmetres, que nosaltres variem per a estudiar la funció objectiu. Aquestes variables poden ser independents (les que es controlen abans de resoldre la funció objectiu, és a dir, els paràmetres d'entrada) o dependents (cada un dels resultats que dóna la funció objectiu, és a dir, els valors de sortida).
- **Restriccions:** són les condicions, imposables sobre les variables de disseny, que s'han de complir. Acostumen a ser imposades sobre els valors de sortida, ja que són els que es generen de la funció objectiu, però també poden ser imposats als paràmetres d'entrada si la situació a resoldre ho demana.

L'optimització és una eina que podem utilitzar dins del procés arquitectònic i que, inconscientment, ja utilitzem. La majoria de vegades es tracta un projecte arquitectònic com quelcom lineal i científic, que parteix d'una voluntat i es materialitza en un edifici mitjançant la combinació i superposició de diferents capes de disseny. Però l'interior d'aquest procés lineal, que efectivament ho és, existeixen multitud de camins, anàlisis, primers resultats, i l'elecció i disseny de cada una de les parts que configuraran l'edifici. És aquí on el procés arquitectònic deixa de ser una progressió lineal per convertir-se en fases encadenades cíclicament, depenent cada una de totes les altres. És en aquestes fases on l'optimització pot prendre una rellevància important dins el disseny del projecte.

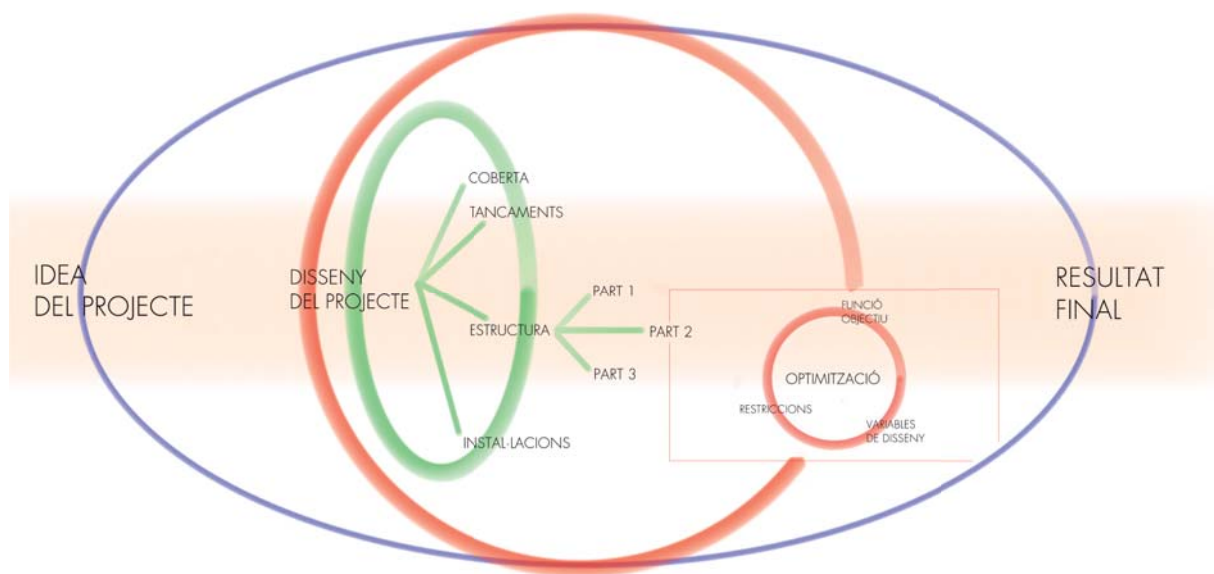


Figura 6-54 El procés constructiu en arquitectura

Cada decisió que es pren per a cada element del projecte té unes conseqüències en les altres parts. El fet d'utilitzar eines matemàtiques no ens evita aquesta tasca, ja que un problema matemàtic ens proposa les millors solucions. La figura 6-57 ens explica la combinació de les restriccions en un problema d'optimització, on es genera una regió tancada amb els valors que compleixen les tres condicions. Aleshores, cada un d'aquests valors són possibles candidats a ser solucions satisfactòries, ja que matemàticament el procés d'optimització ja hauria finalitzat. En aquest punt es retorna al factor subjectiu del disseny, la visió de l'arquitecte, que és el que ha de decidir quins valors prevalen

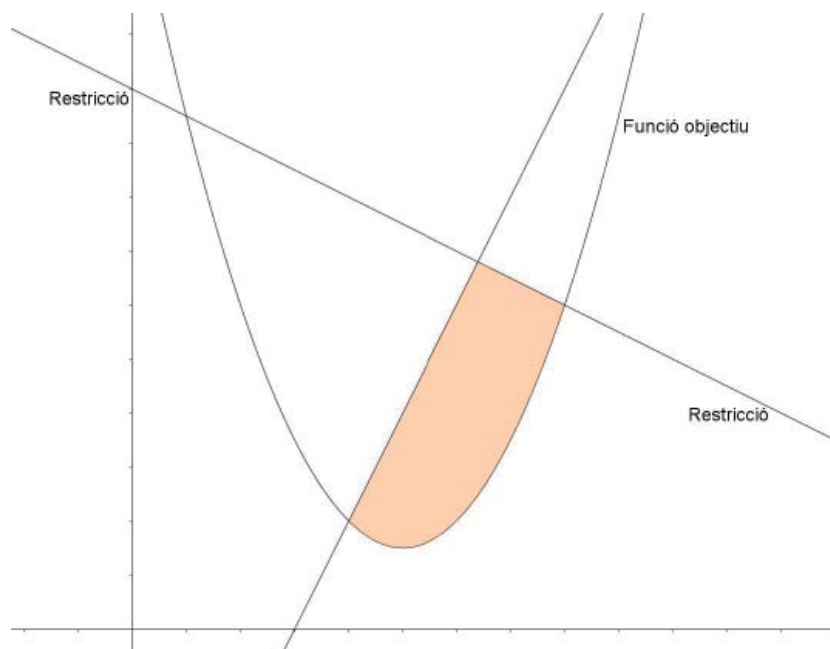


Figura 6-55 Gràfic d'un problema d'optimització.

sobre els altres.

De fet, la decisió que prenem com arquitectes afecta directament a la forma final dels elements constructius. Per això les tant les variables de disseny com les restriccions no només han de ser magnituds quantificables. També poden recaure en el disseny estructural global o en la imatge que desitgem malgrat que, moltes vegades, no en som conscients.

6.2 Objectius del procés d'optimització, secció i variables de disseny

S'han de complir els següents objectius:

- Complir els requisits definits en els estats límits últims i de servei del capítol 5.
- Trobar la forma òptima que ens fa complir els estats límits de manera eficient i amb el mínim material.
- Trobar la forma òptima que permet fabricar la placa d'UHPC sense necessitat d'armar-la.

La peça d'UHPC està definida a partir de tres seccions. Les dues seccions principals de la peça són la A, que li dona el cantell necessari, i la C, que enllaça amb el suport. Per això, ha calgut definir una tercera secció intermitja (B), que permeti una bona transició entre les altres dues seccions i doni a la peça la curvatura longitudinal necessària.

Per tal d'agilitzar el procés d'optimització al software, i també per a conèixer amb antelació el comportament de la peça, he dut a terme un primer procés d'optimització manual que em permetrà acotar els intervals de cada un dels paràmetres. El programa d'anàlisi té l'opció d'entrar no només els paràmetres necessaris, sinó també l'interval en què estan definits i el nombre de pas entre els seus extrems. Les variacions poden ser de l'ordre de mil·límetres, per la qual cosa és recomanable acotar, tant com sigui possible, el rang de cada un dels paràmetres.

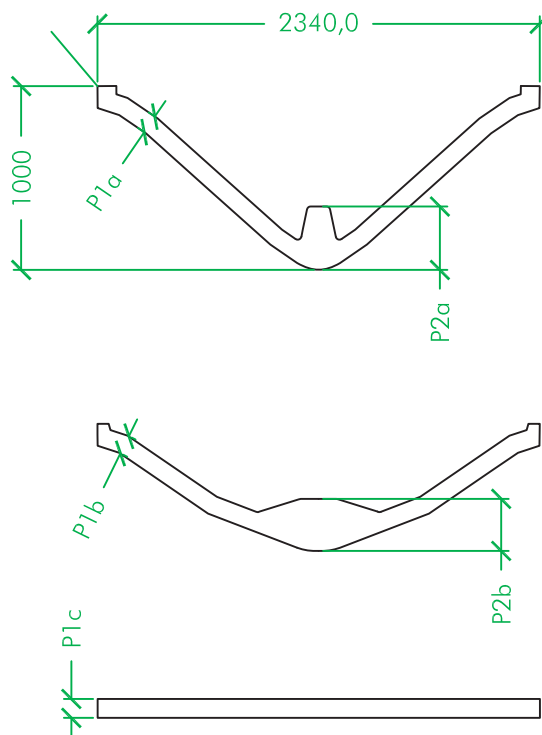


Figura 6-56 Seccions que defineixen la geometria de la biga. A dalt: secció central (A). Al mig, secció intermitja (B). A sota, secció de l'extrem (C).

6.2.1 Resultats del primer procés d'optimització manual

En aquest cas els valors dels paràmetres que es prenen són molt diferents, de manera que pugui avaluar grosso modo les dimensions de la peça i quins poden ser els intervals per a cada paràmetre.

Amb aquest primer procés observem que cal donar un gruix molt elevat a la secció per tal de reduir els esforços de tracció. Conseqüentment, per l'augment de l'àrea de la secció, també es redueix l'esforç de compressió. En aquest cas només estem optimitzant la secció per l'esforç de tracció.

De manera manual es fa molt difícil poder determinar quins paràmetres d'entrada tenen més o menys relació amb els valors de tensió i deformació, tot i que podem observar que segons quins paràmetres de la secció es canvien, les variacions en els resultats de tensió i deformació són més altes o més petites.

- Entre l'anàlisi núm. 1 i el núm. 3, la variació dels paràmetres P1a, P1b i P1c (tots corresponents a gruixos o cantells, provoquen una reducció notable de l'esforç de tracció (30%) i

	Paràmetres: longitud, mm					Tensió, MPa			Def, mm	
	P1a	P2a	P1b	P2b	P1c	$\sigma_{ck} < 80$	$\sigma_{tk} < 8$	$\delta_{max} < 28,07$		
1	100,00	335,40	100,00	200,00	100,00	27,81	27,41	50,90		
2	125,00	335,40	125,00	200,00	125,00	27,74	23,45	47,60		
3	140,00	335,40	140,00	200,00	140,00	24,31	19,08	40,70		
4	125,00	360,00	140,00	200,00	125,00	25,36	20,75	43,77		
5	150,00	360,00	150,00	200,00	150,00	17,15	14,75	34,75		
6	150,00	450,00	150,00	350,00	125,00	13,97	12,95	37,51		
7	200,00	450,00	200,00	350,00	200,00	11,85	10,27	31,67		
8	150,00	550,00	150,00	350,00	150,00	12,59	11,44	36,31		

Taula 10. Valors dels paràmetres d'entrada i sortida de 8 anàlisis.

també de la deformació (20%), que en aquest cas compleix els estats límit de servei.

- També entre l'anàlisi núm. 4 i el núm. 5, que tenint una alçada central i gruixos més elevats, la tracció es redueix en un 29% (un 46% respecte el primer anàlisi), i la deformació en un 20% (un 31% respecte el primer anàlisi).
- En tots els casos, però, queda lluny el compliment dels estats límits últims en la resistència a la tracció.

Seria una contradicció seguir augmentant tota la secció a parts iguals si tenim present que l'UHPC és un material que requereix una secció molt reduïda per a suportar esforços grans, per la qual cosa és necessari introduir noves modificacions en la secció. De fet, en els diagrames d'esforços es pot observar que les tensions màximes (traccions) i mínimes (compressions) es donen en les seccions A o B de la placa, i sempre a la zona central. Als seus extrems (les parts superiors de la placa), l'esforç a què està sotmès el material és molt petit.

6.3 Segona optimització: parametrització de la geometria i anàlisi amb ANSYS

En el cas anterior es considerava tota l'ala de la placa com un sol gruix. Si analitzem amb atenció els diagrames extrets de l'ANSYS, podem concloure que s'ha de proporcionar més material a la part central i inferior de la placa, i que podem treure material dels seus extrems. Per això a la llista de paràmetres d'entrada canviem dos dels paràmetres existents per 4 de nous. Els gruixos de les ales es diferenciaran entre el gruix de la part inferior (P4), on hi ha l'ànima de la placa, i el gruix de la part superior (P5). D'aquesta manera tota l'ala té un gruix variable en la seva longitud. A la taula 10 hi ha els paràmetres d'entrada definits a la geometria.

Per a tornar a dur a terme un nou procés d'optimització amb 7 paràmetres, aquesta vegada ho farem amb ANSYS. En aquest cas, el programa ens permet definir tots els paràmetres d'entrada amb uns intervals, i també els paràmetres de sortida (tensions i deformacions), imposant unes condicions de contorn dels intervals per a assolir una valors màxims o mínims.

6.3.1 Observacions prèvies al procés d'optimització

ANSYS és capaç de treballar amb hipòtesis de càrrega i combinar els diferents estats de càrrega segons les exigències de seguretat i integritat estructural definides als estats límits últims i de servei.

Localització	Paràmetre
Secció A (centre)	P3a: Gruix superior de l'ala
	P4a: Gruix inferior de l'ala
	P5a: Alçada 1 de l'ànima central
Secció B (mig)	P3b: Gruix superior de l'ala
	P4b: Gruix inferior de l'ala
	P5b: Alçada de l'ànima central
Secció C (suport)	P6: Cantell

Taula 11. Paràmetres d'entrada (segona optimització)

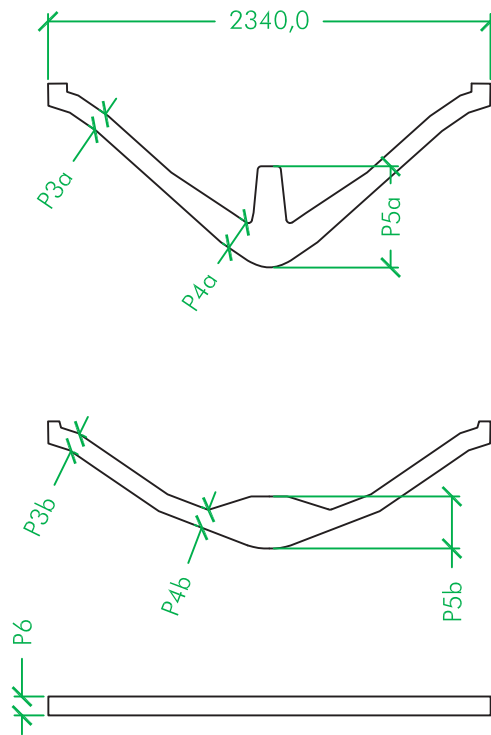


Figura 6-57 Seccions i definició dels paràmetres d'entrada.

Tot i això, només ho permet fer en anàlisis individuals, i no pas en un procés d'optimització. Per això, cal calcular la contribució de cada estat de càrregues (càrregues permanents i variables) en les tensions de tracció i compressió i la deformació vertical..

Les càrregues permanents contribueixen en un 60 % en els valors totals i les variables, un 40 %.

- Els valors límit en el cas de l'esforç de tracció són 3,54 MPa per a les càrregues permanents i 2,11 MPa per a les variables.
- Els valors límit en el cas de l'esforç de compressió són 34,87 MPa per a les càrregues permanents i 22,10 MPa per a les variables.
- Els valors límit en el cas de la deformació vertical són 12,08 mm per a les càrregues permanents i 7,86 mm per a les variables.

Per a l'optimització amb ANSYS, el programa ens genera per defecte uns intervals per als paràmetres d'entrada, a partir d'uns valors inicials. Aquests valors i els intervals estan definits en la taula 14.

Paràmetre	Valor inicial	Límit inferior	Límit superior
P3a: Gruix superior de l'ala	150 mm	120 mm	150 mm
P4a: Gruix inferior de l'ala	250 mm	225 mm	275 mm
P5a: Alçada 1 de l'ànima central	900 mm	800 mm	900 mm
P3b: Gruix superior de l'ala	150 mm	120 mm	150 mm
P4b: Gruix inferior de l'ala	250 mm	225 mm	275 mm
P5b: Alçada de l'ànima central	600 mm	540 mm	600 mm
P6: Cantell	200 mm	150 mm	200 mm

Taula 14. Paràmetres d'entrada (segona optimització)

L'entorn d'ANSYS també demana com ha de generar cada combinació. En un primer cas, se li

demana que generi 50 combinacions (DP, design points) i que seleccioni els tres DP més favorables. Després d'aquest primer intent, en fem un segon acotant més els intervals dels paràmetres d'entrada, reduint o ampliant-los segons els resultats.

Amb aquestes dues optimitzacions he obtingut els següents resultats:

	Candidate Point 2	Candidate Point 1	Candidate Point 3	Candidate Point 4	Candidate Point 6	Candidate Point 5
P3a - AUpperThickness	0,1414 m	0,1475 m	0,1320 m	0,1241 m	0,1428 m	0,1362 m
P4a - ALowerThickness	0,2724 m	0,2514 m	0,2563 m	0,2427 m	0,2588 m	0,2668 m
P5a - Aheight	0,8471 m	0,8737 m	0,8756 m	0,8254 m	0,8247 m	0,8259 m
P3b - BUpperThickness	0,1631 m	0,1521 m	0,1509 m	0,1543 m	0,1473 m	0,1459 m
P6b - BLowerThickness	0,2459 m	0,2357 m	0,2270 m	0,2291 m	0,2398 m	0,2240 m
P5b - Bheight	0,5452 m	0,5432 m	0,5391 m	0,5299 m	0,5630 m	0,5451 m
P6 - Cthickness	0,2156 m	0,1980 m	0,2062 m	0,1654 m	0,1820 m	0,1810 m
Q1p - Directional Deformation Minimum	-11,06 mm	-11,40 mm	-11,25 mm	-12,40 mm	-11,45 mm	-11,61 mm
Q1v - Directional Deformation Minimum	-13,47 mm	-13,96 mm	-13,86 mm	-15,14 mm	-14,18 mm	-14,48 mm
Q1 - Directional Deformation Minimum	-35,14 mm	-36,34 mm	-35,98 mm	-39,45 mm	-36,73 mm	-37,39 mm
Q2v - Normal Stress Minimum	-4,91 MPa	-4,93 MPa	-4,87 MPa	-4,48 MPa	-4,99 MPa	-5,05 MPa
Q2p - Normal Stress Minimum	-4,04 MPa	-4,04 MPa	-3,96 MPa	-3,67 MPa	-4,04 MPa	-4,06 MPa
Q2 - Normal Stress Minimum	-12,82 MPa	-12,85 MPa	-12,65 MPa	-11,68 MPa	-12,94 MPa	-13,04 MPa
Q3v - Normal Stress Maximum	2,57 MPa	2,81 MPa	2,90 MPa	2,94 MPa	3,01 MPa	3,06 MPa
Q3p - Normal Stress Maximum	2,12 MPa	2,30 MPa	2,35 MPa	2,41 MPa	2,44 MPa	2,46 MPa
Q3 - Normal Stress Maximum	6,72 MPa	7,32 MPa	7,52 MPa	7,66 MPa	7,81 MPa	7,92 MPa

Taula 15. Resultats del procés d'optimització de la placa "biga". Q1: deformació vertical; Q2: esforç de compressió; Q3: esforç de tracció; p: contribució de les càrregues permanents; v: contribució de les càrregues variables.

En l'elecció del punt més favorable es té en compte quin genera el mínim esforç de tracció. També coincideix amb la mínima deformació vertical i amb un dels valors més grans de l'esforç de compressió. A més, aquests valors són per una placa conformada únicament per UHPC, sense necessitat d'armadura a la cara inferior per a resistir les traccions (fet habitual quan es treballa amb formigons), de manera que es redueixen els costos econòmics i temporals de producció.

Les tensions que ens dona ANSYS són el l'eix X, per la qual cosa cal mirar, per aquests sis punts candidats, les tensions en les altres dues direccions. Prenent el punt més favorable per a les traccions en l'eix X, obtenim uns resultats poc satisfactoris (taula 16).

Encara que es compleixin les restriccions en una direcció, les de les direccions Y (en alçada) i superen les condicions imposades en els intervals d'optimització. Caldria armar la secció per poder resistir els esforços.

Compressió, MPa	X	-12,82
	Y	-19,59
	Z	-22,32
Tracció, MPa	X	6,72
	Y	9,01
	Z	24,53

Taula 16. Tensions màximes i mínimes en els tres eixos

Amb tots aquests anàlisis estructurals arribem a una primera conclusió, i és que la geometria de la placa no ens permet complir els estats límits últims. En aquest punt se'ns presenten diferents itineraris:

- El projecte tracta sobre la optimització d'una peça estructural ja definida en un projecte. En aquest cas es demana modificar-ne algunes de les seves dimensions sense variar-ne substancialment la forma. Si es mantingués la forma de la placa i es volgués reduir l'esforç de tracció, caldria augmentar considerablement els gruixos de les diferents parts de la placa per a tenir seccions més grans, la qual cosa contradiu el propi procés d'optimització i les hipòtesis plantejades sobre l'ús de l'UHPC.
- L'objectiu de l'optimització és trobar la forma idònia que redueixi a mínims l'esforç de tracció. Si el que es vol és obtenir una placa d'UHPC que treballi a compressió pura, aleshores la forma amb què estem treballant no és l'adequada. En aquest altre cas caldria contemplar l'opció de fer una peça més alta perquè segueixi millor la descripció de la línia de càrrega. Així aquesta placa podria tenir un cantell més reduït, però les modificacions de la geometria són notables i generarien una nova imatge de la coberta de l'estació.
- A part de les decisions que puguem prendre directament per qüestions internes de la placa d'UHPC, hi ha altres elements que també en condicionen la seva forma sense formar-ne part, creant sinergies, com poden ser les jàsseres que reben aquestes plaques, els pilars o quelcom tan senzill com les condicions de contorn. Per tant, un tercer itinerari seria prendre una decisió relacionada amb tot el disseny de l'estructura, com per exemple variar algun element extern de la placa per a millorar el seu comportament estructural.

6.4 Biga corbada o arc?

Les eleccions sobre els tipus d'elements estructurals que volem en el projecte, al cap i a la fi, són els que determinen la forma final de la placa. Fins ara aviam considerat la placa d'UHPC com una biga corbada amb dos suports: un d'ells és una articulació sense moviment longitudinal (només rotació), i l'altre amb el moviment sobre l'eix longitudinal sense fixar (que pugui lliscar).

Aquest comportament és propi de les bigues autoportants en forjats unidireccionals convencionals, o els arquitraus dels temples grecs, en què l'element només es recolza sobre els elements estructurals verticals. El fet de sotmetre la biga corbada a càrregues verticals provoca que la biga s'obri, desplaçant un dels seus recolzaments. Per tal d'evitar aquest moviment, apareixen traccions en les seccions de la placa (esforços que són contraris a la naturalesa del material), i per reduir les traccions cal incrementar l'àrea de les seccions més afectades per les traccions. Per altra banda, aquest tipus de bigues pateixen flexió i, per tant, es deformen en el sentit de la càrrega. La deformació màxima

es troba en la secció central, i és en aquest punt que cal incrementar el cantell de la secció.

Els resultats obtinguts anteriorment responen a una biga corbada de dimensions optimitzades, però això no significa que sigui la forma òptima per a suportar les càrregues.

La diferència entre una biga corbada i un arc es troba en com es comporten els seus recolzaments. Si a una biga corbada se li permet el moviment d'un recolzament en direcció longitudinal, a l'arc no se li permet cap moviment en cap dels dos recolzaments, excepte la rotació. Com que l'arc no s'obre, no apareixen traccions que hagin de contrarestar el desplaçament d'un suport i, per tant, la quantitat de material que caldria fer servir seria molt menor. Les tensions internes de l'element es van acumulant al llarg de la línia de càrrega i, similarmet a una columna o un pilar, les seccions de la part baixa han de suportar una càrrega major i, per tant, han de tenir majors dimensions. La contrapart de tenir dos suports fixos és que les càrregues es transmeten en els tres eixos cap als següents elements estructurals.

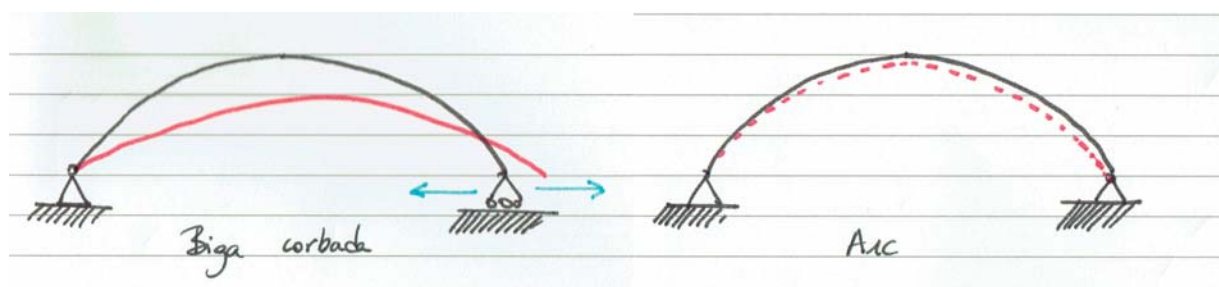


Figura 6-58 Afectació de les condicions de contorn en elements corbats: biga i arc.

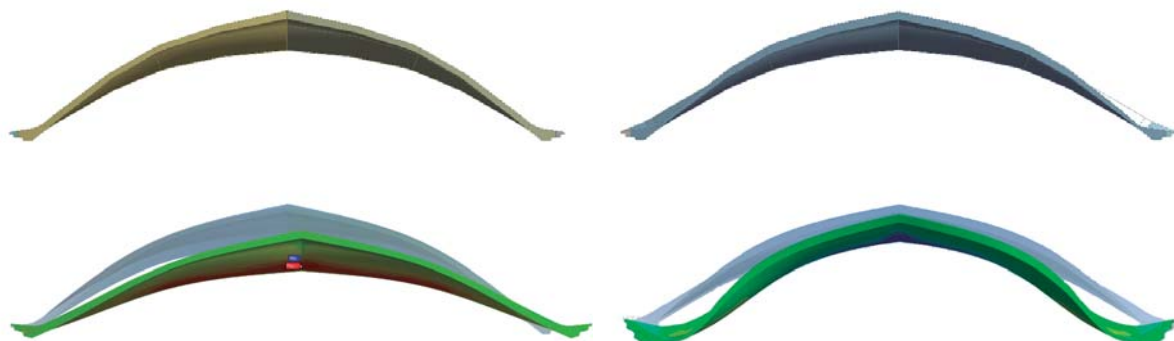


Figura 6-59 Simulacions de deformació de la placa. A l'esquerra, placa "biga"; a la dreta, placa "arc".

Plantejem, doncs, una nova hipòtesi de treball: una peça corbada en sentit longitudinal troba el seu millor comportament quan se'l considera un arc, fixant els seus suports i només permetent la rotació en els tres eixos. D'aquesta manera, desapareixen les traccions provocades pel desplaçament dels suports i el material treballa a compressió, i s'aconsegueix suportar les mateixes càrregues amb menys quantitat de material.

6.4.1 Tercera optimització

Per això, tornem a l'ANSYS. Recuperem la geometria estreta de l'apartat anterior i canviem les condicions de contorn de la placa d'UHPC, de manera que ambdòs suports tinguin els desplaçaments en els tres eixos anul·lats.

Després d'un primer anàlisi, i comparats amb els resultats de la segona optimització, els resultats són satisfactoris i esperençadors: **les compressions s'han reduït en un 45 %, les traccions, un 75 %, i la deformació màxima, un 97 %.** Tot això només canviant les condicions de contorn de la placa.

Al complir-se amb escriu la limitació a tracció i la deformació, podem eliminar material de la placa per retornar als valors inicials i, fins i tot, reduir-ho encara més. Tornem a parametritzar els valors de disseny de les seccions de la biga, per a trobar les dimensions mínimes que pot tenir la peça per a suportar els esforços. En aquest cas, però, estem treballant amb gruixos molt petits i molt poc comuns quan es treballa amb formigó. En tot el treball el que hem demanat a l'UHPC és que sigui capaç de resistir els esforços sense necessitat d'utilitzar armat, i per tant poder tenir seccions molt petites, però no més de 30 mm.

Per altra banda, observem amb els diagrames de la placa deformada, que l'arc té tendència a corbar-se cap a dins en els punts baixos, per la qual cosa, el nervi central s'allargarà fins l'extrem. A més, també servirà per augmentar la secció als extrems de la placa.

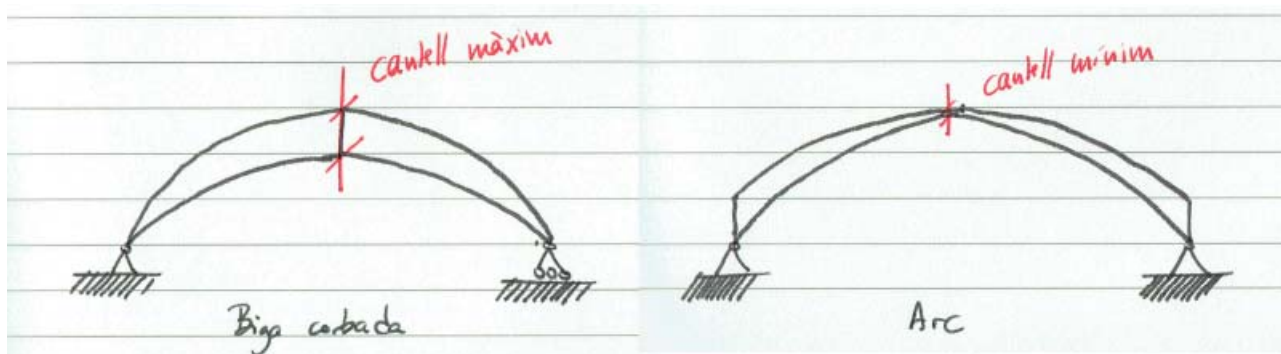


Figura 6-60 Geometria òptima per a bigues corbades (cantell màxim central) i arcs (cantell màxim als extrems).

Els intervals d'optimització de les noves seccions són els següents:

Paràmetre	Valor inicial	Límit inferior	Límit superior
P3a: Gruix superior de l'ala	40 mm	30 mm	44 mm
P4a: Gruix inferior de l'ala	60 mm	50 mm	80 mm
P5a: Alçada de l'ànima central	250 mm	225 mm	275 mm
P3b: Gruix superior de l'ala	40 mm	30 mm	50 mm
P4b: Gruix inferior de l'ala	80 mm	60 mm	90 mm
P5b: Alçada de l'ànima central	300 mm	275 mm	325 mm
P6b: Cantell	60 mm	40 mm	80 mm
P6c: Alçada de l'ànima central	350 mm	325 mm	375 mm
P7: Alçada de l'ànima central	250 mm	225 mm	275 mm

Taula 17. Intervals de parametrizació per a la placa "arc"

La placa d'UHPC ara està definida per 4 seccions: la secció A (central) i la secció B (intermitja) són similars a les que hem utilitzat en la placa en configuració de biga. La secció C (la que fa la transició cap al suport) ha canviat. En un primer anàlisi amb aquesta secció sense optimitzar podem observar com la placa té tendència a corbar-se per les seccions més baixes. Per això la part central de la secció és reforçada amb una secció estreta però més alta, que li proporciona inèrcia contra la deformació.

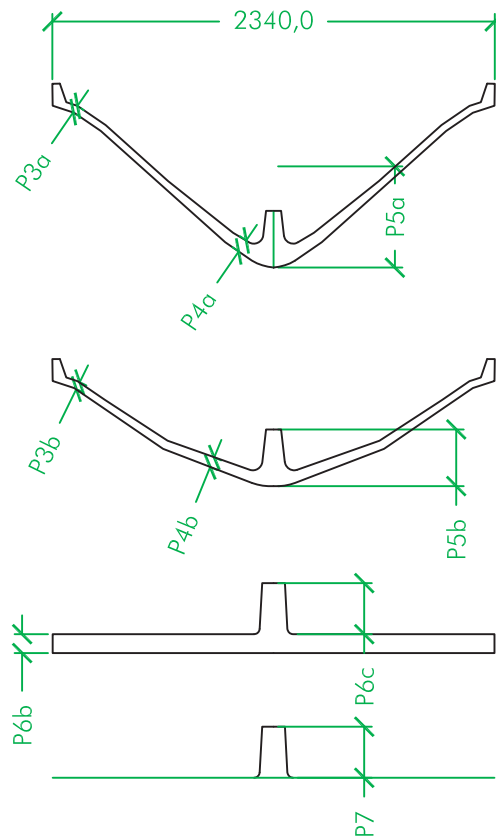


Figura 6-61 Plànol (e 1:50) de les noves seccions

Aquesta vegada, i com que estem treballant amb valors molt petits, demanem a ANSYS que generi fins a 200 punts de disseny i que ens seleccioni 5 candidats. Són els que s'exposen a la taula 18.:

En verd he marcat els punts candidats que considero més rellevants.

- **Candidate point 1:** minimitza les compressions i presenta un dels valors més baixos de deformació vertical. Tot i això, té el segon valor d'esforç de tracció més alt (tot i que queda molt lluny de la restricció de 8 MPa pròpia del material. Prioritza la restricció de minimitzar les traccions.
- **Candidate point 2:** té el valor més petit d'esforç de tracció, però no minimitza les compressions (en valor absolut, l'esforç de compressió és el més alt). Prioritza la restricció de maximitzar les compressions.

ANSYS, a part de generar resultats durant l'optimització, també genera una gran quantitat d'informació estadística: taules de valors, gràfics de correlació, matrius. Analitzada correctament, permet descriure i explicar les relacions que s'estableixen entre els paràmetres d'entrada amb els de sortida, de manera que es pot determinar quines són aquelles dimensions de la biga que afecten més a les variacions dels valors de tensió i de deformació.

Per exemple, la figura 6-64 ens mostra la matriu de correlació entre els diferents paràmetres d'entrada i sortida. Aquesta informació és molt útil per a seguir estudiant la peça. El seu codi de colors ens ajuda a identificar el grau de relació entre paràmetres. Cal destacar, doncs:

- **L'alçada del nervi central és determinant per a complir amb els estats límit de servei, ja que hi ha una relació directa entre aquesta alçada i la deformació vertical. El gruix del nervi central al llarg de la placa d'UHPC no ve només determinada per aquesta dimensió en la secció**

# Name	Attempt 1	Restriccions	Candidate Point 5	Candidate Point 4	Candidate Point 3	Candidate Point 2	Candidate Point 1		
P3a - AUpperThickness (m)			0,0300 m	0,0363 m	0,0317 m	0,0409 m	0,0410 m		
P4a - ALowerThickness (m)			0,0501 m	0,0618 m	0,0681 m	0,0649 m	0,0721 m		
P5a - AHeight (m)			0,2101 m	0,2159 m	0,2267 m	0,2213 m	0,2479 m		
P3b - BUpperThickness (m)			0,0301 m	0,0488 m	0,0358 m	0,0596 m	0,0469 m		
P4b - BLowerThickness (m)			0,0501 m	0,0519 m	0,0643 m	0,0830 m	0,0688 m		
P5b - BHeight (m)			0,2301 m	0,2415 m	0,2406 m	0,2376 m	0,2306 m		
P6b - CThickness (m)			0,0501 m	0,0629 m	0,0567 m	0,0532 m	0,0572 m		
P6c - CHeight (m)			0,2601 m	0,2902 m	0,2643 m	0,3022 m	0,2939 m		
P7 - DHeight (m)			0,1801 m	0,1861 m	0,2198 m	0,1831 m	0,1953 m		
Q1p - Directional Deformation Minimum, mm	P	0,40 mm	58%	12,08 mm	-0,50 mm	-0,40 mm	-0,42 mm	-0,39 mm	-0,40 mm
Q1v - Directional Deformation Minimum, mm	v	0,27 mm	42%	7,86 mm	-0,40 mm	-0,28 mm	-0,31 mm	-0,25 mm	-0,26 mm
Q1 – Directional Deformation Minimum, mm		-0,93 mm		28,07 mm	-1,27 mm	-0,95 mm	-1,04 mm	-0,91 mm	-0,93 mm
Q2p - Normal Stress Minimum, MPa	P	3,77 MPa	59%	-34,87 MPa	-2,35 MPa	-2,34 MPa	-2,56 MPa	-2,70 MPa	-3,77 MPa
Q2v - Normal Stress Minimum, MPa	v	2,39 MPa	41%	-22,10 MPa	-1,85 MPa	-1,56 MPa	-1,79 MPa	-1,64 MPa	-2,39 MPa
Q2 – Normal Stress Minimum, MPa		-8,65 MPa		-80,00 MPa	-5,95 MPa	-5,49 MPa	-6,14 MPa	-6,11 MPa	-8,66 MPa
Q3p - Normal Stress Maximum, MPa	P	0,62 MPa	60%	3,54 MPa	0,66 MPa	0,45 MPa	0,53 MPa	0,45 MPa	0,62 MPa
Q3v - Normal Stress Maximum, MPa	v	0,37 MPa	40%	2,11 MPa	0,42 MPa	0,27 MPa	0,34 MPa	0,29 MPa	0,37 MPa
Q3 - Normal Stress Maximum, MPa		1,40 MPa		8,00 MPa	1,51 MPa	1,02 MPa	1,22 MPa	1,04 MPa	1,40 MPa

Taula 18. Resultats del procés d'optimització de la placa "arc". Q1: deformació vertical; Q2: esforç de compressió; Q3: esforç de tracció; p: contribució de les càrregues permanents; v: contribució de les càrregues variables.

central, que és la que pateix la deformació màxima, sinó per les dimensions de cada una de les seccions d'aquest nervi. Concretament, la secció que ens ofereix una millor variació d'alçada és la secció B, i per això la matriu ens ho dona com un valor determinant per al càlcul de la deformació màxima.

- La tensió en una secció depèn de l'àrea d'aquesta secció. En aquest sentit, la relació entre el gruix de la part inferior és clau per a resistir l'esforç de tracció que es produeix en la cara inferior de la placa a l'entorn de l'eix central.
- S'estableix també una relació directa entre l'esforç normal màxim (tracció) i mínim (compressió), i en aquest cas la relació és oposada a les dues anteriors. Com més gran és l'esforç de compressió que pateix la placa, menor és l'esforç de tracció. Aquesta és una dada molt important en la valoració de l'optimització, ja que ens dóna a entendre que la tracció i la compressió són excloents. Al tractar-se de formigó, el que busquem com a últim objectiu és que el material estigui comprimit perquè sigui eficient el seu ús.

Com que no hi ha diferències significatives entre els punts candidats, així com tampoc n'hi ha en les dimensions (a simple vista), ens podem basar en altres característiques físiques, com són el volum i la massa — és una peça de grans dimensions, i per tant una lleugera variació en alguna dimensió

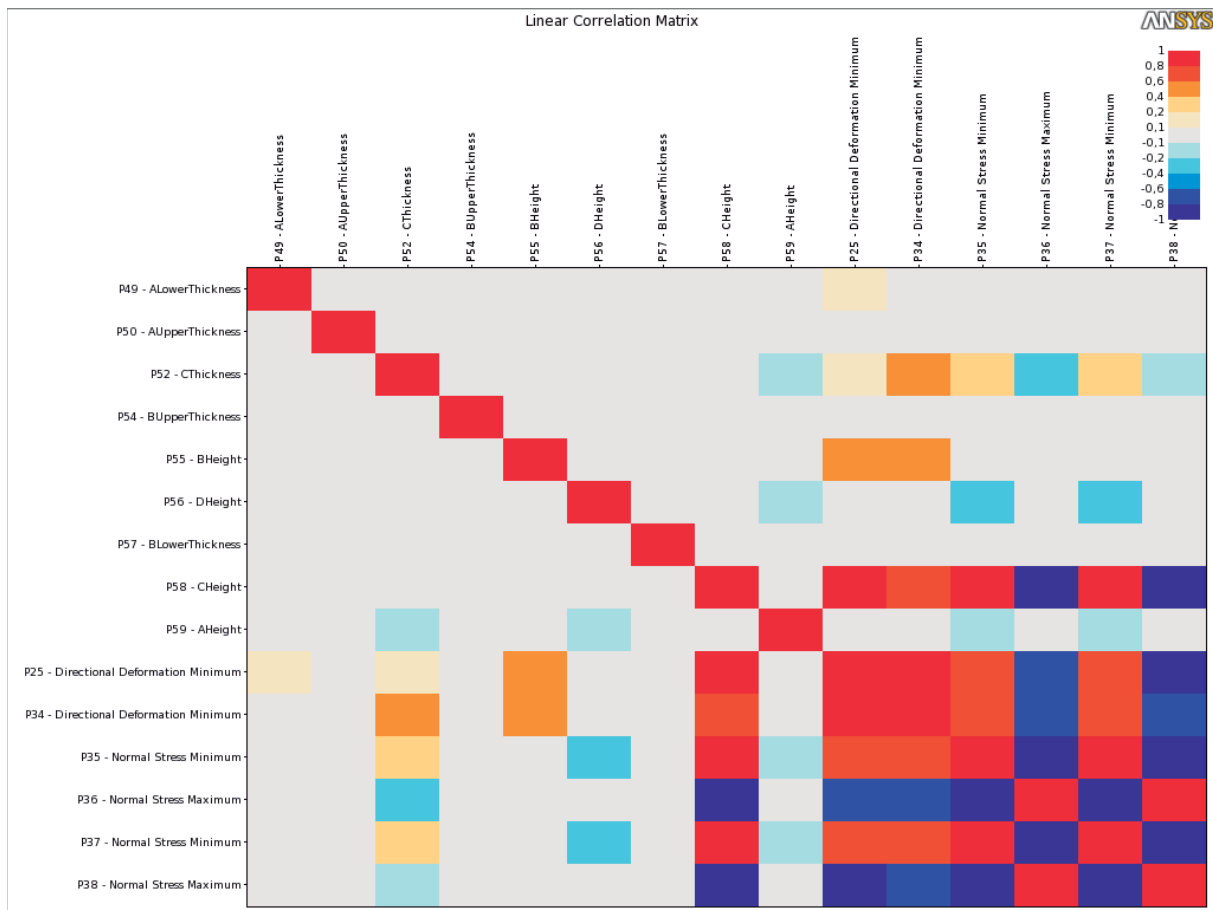


Figura 6-62 Matriu de correlació de les variables de disseny. La intensitat del color marca la intensitat de la relació entre variables de disseny. El gris marca una relació baixa o nul·la.

poc provocar un augment notable en la massa o el volum.

Comparant la massa i el volum de formigó utilitzat en les plaques 1 i 4 (taula 20), la decisió més encertada serà la d'optar per la placa 1. Amb una sola peça les diferències no són grans, però si tenim present que la coberta de l'edifici consta de 105 plaques d'UHPC, l'elecció de les mesures del punt 1 suposen un estalvi de més de 62 tones i 25 m³ de material. Això comporta, a més a més, un estalvi econòmic pels pressupostos, estalvi energètic en la producció del formigó, i també suposen un benefici pel disseny de l'estructura del projecte, ja que ens permet utilitzar dimensions més petites per a tots els elements del projecte.

		Candidate point 1	Candidate point 4
Massa	kg	7.099	7.691
Volum	m ³	2,856	3,094

Taula 19. Massa i volum de les plaques amb les dimensions dels punts candidats 1 i 4.

7 Valoració dels resultats

Com ja s'ha explicat al principi del capítol, el procés d'optimització ens dóna una gran quantitat de resultats possibles, diferents els uns dels altres. Alguns resultats prioritzen unes variables, altres resultats donen importància a altres. És tasca de l'arquitecte escollir quin dels resultats candidats és que més favorable segons els seus interessos.

L'optimització per se no és la finalitat: no es pot finalitzar el projecte simplement presentant i utilitzant un conjunt de valors, ja que aleshores el procés de disseny es redueix a algorismes matemàtics resolts per ordinador. L'anàlisi d'una peça optimitzada, per part de l'arquitecte, permet, per exemple, localitzar en la placa d'UHPC quins són els punts més sol·licitats (els que suporten més tensions). De fet, ja al principi de l'anàlisi estructural, al capítol 5, una de les modificacions que fèiem sobre la peça era obviar dels lluernaris, de manera que poguessim conèixer el comportament del material i de la placa i localitzar-ne els punts crítics.

Tots aquests treballs amb ANSYS han de ser una eina més de treball, igual que el dibuix en paper o en AutoCAD. En podem extreure gràfics que ens expliquen el comportament de cada punt de la biga, i ens fa conèixer les zones més sensibles a les càrregues i les zones menys sensibles. Tot això amb l'objectiu de retornar al disseny original amb què vam iniciar l'estudi estructural.

7.1 Utilitats de l'optimització: efectes sobre el disseny

A les següents figures se'ns mostren la secció principal de la placa inicial (proposada pel projecte de l'estació) i el resultat final dels processos d'optimització pel que fa a la placa d'UHPC en condició d'arc (figures 6-65 i 6-66) i en condició de biga (figures 6-64).

Cobrir grans llums, combinat amb haver de cobrir grans espais, exigeix afrontar disseny arquitectònic des de la vessant estructural i econòmica: mínim cost i màxima eficiència, però també que el manteniment sigui mínim, quelcom que demanem contínuament a tots els edificis (i per això el formigó armat és tan preuat). Si l'estructura de la coberta, a més, pot fer de forjat — de coberta pròpiament dit —, la complexitat augmenta. Això és sobre el que s'ha treballat en aquest projecte.

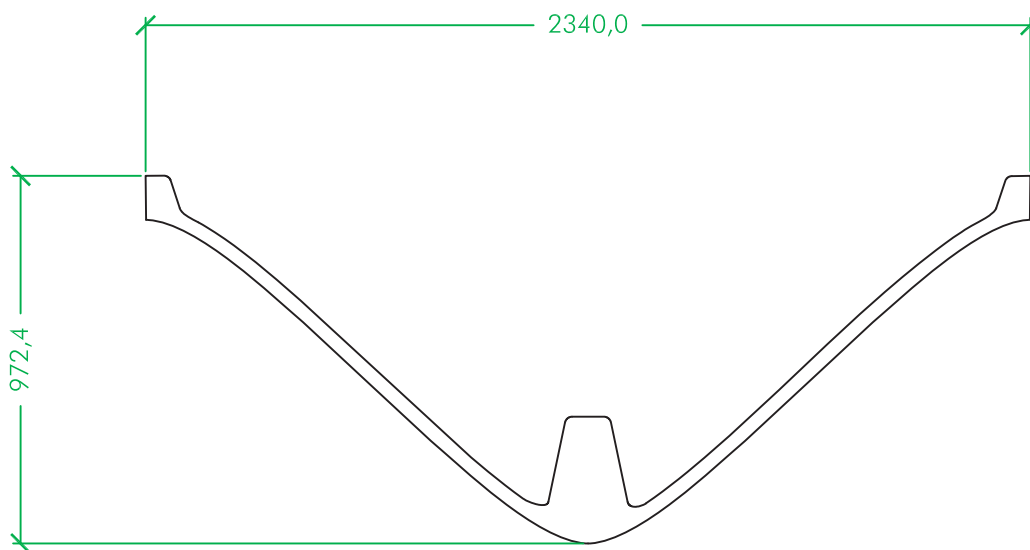
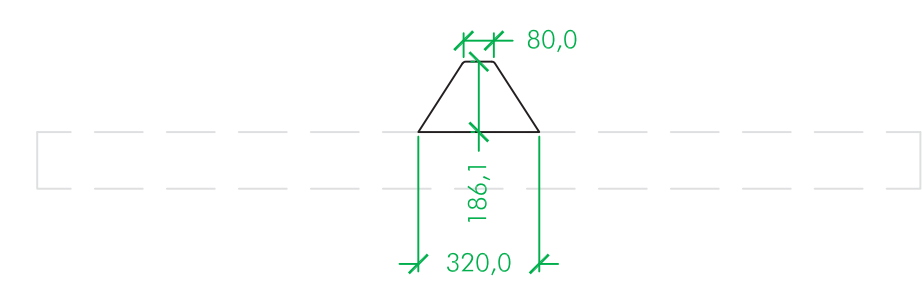
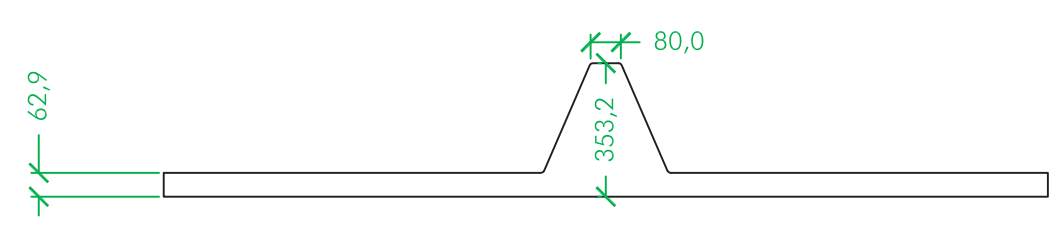
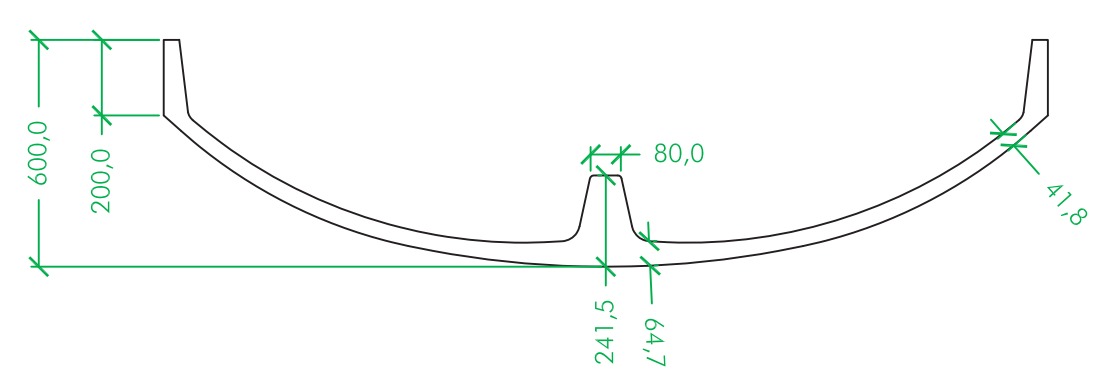
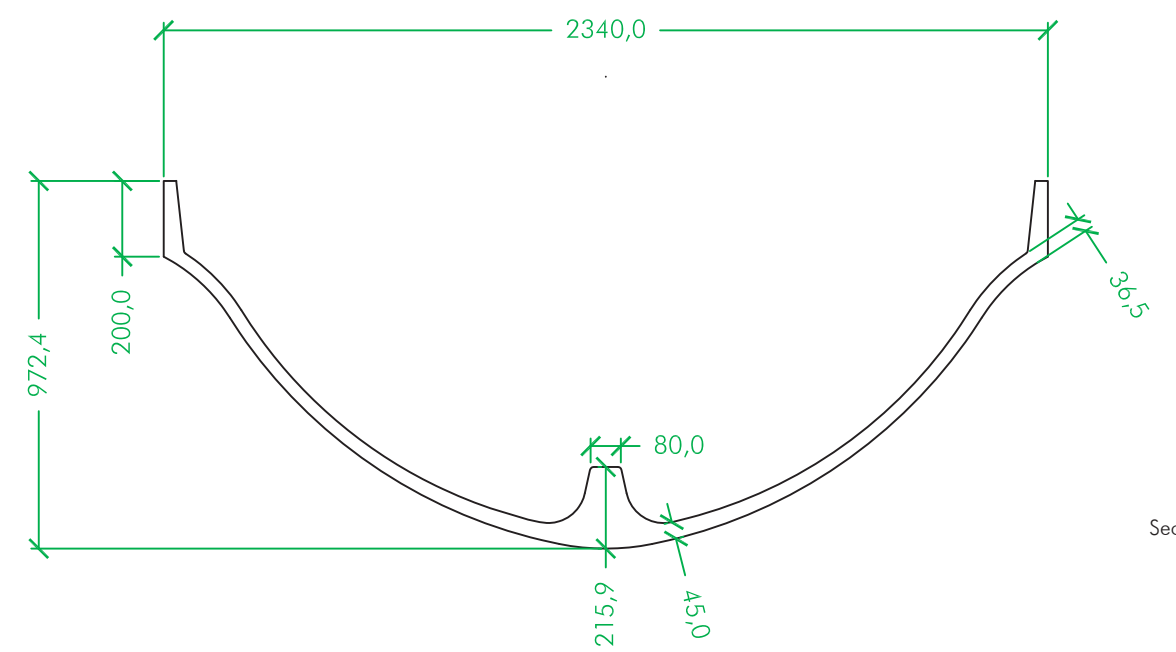
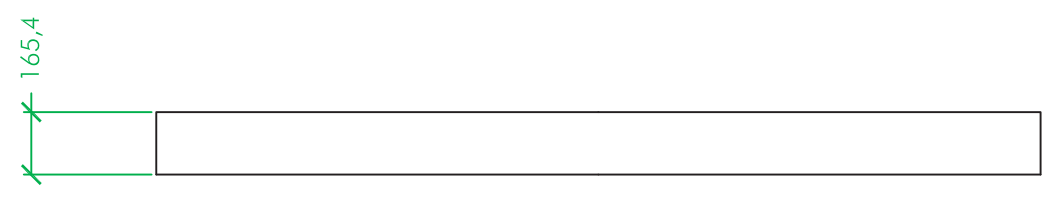
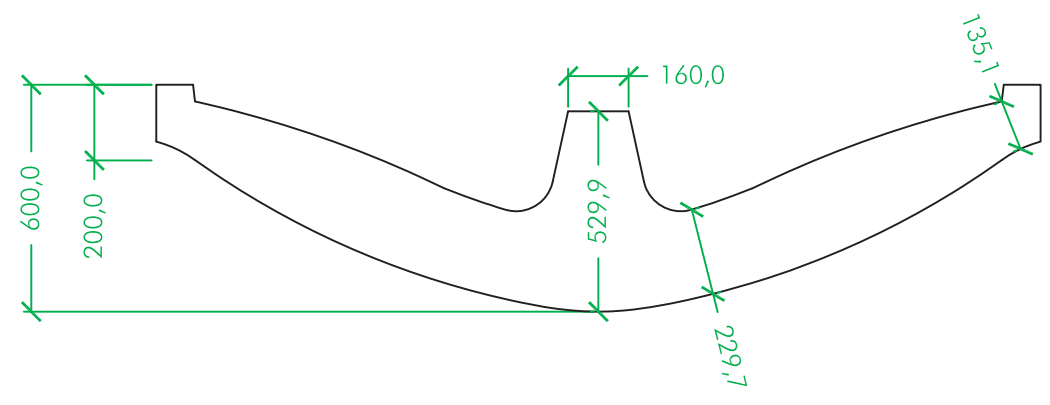
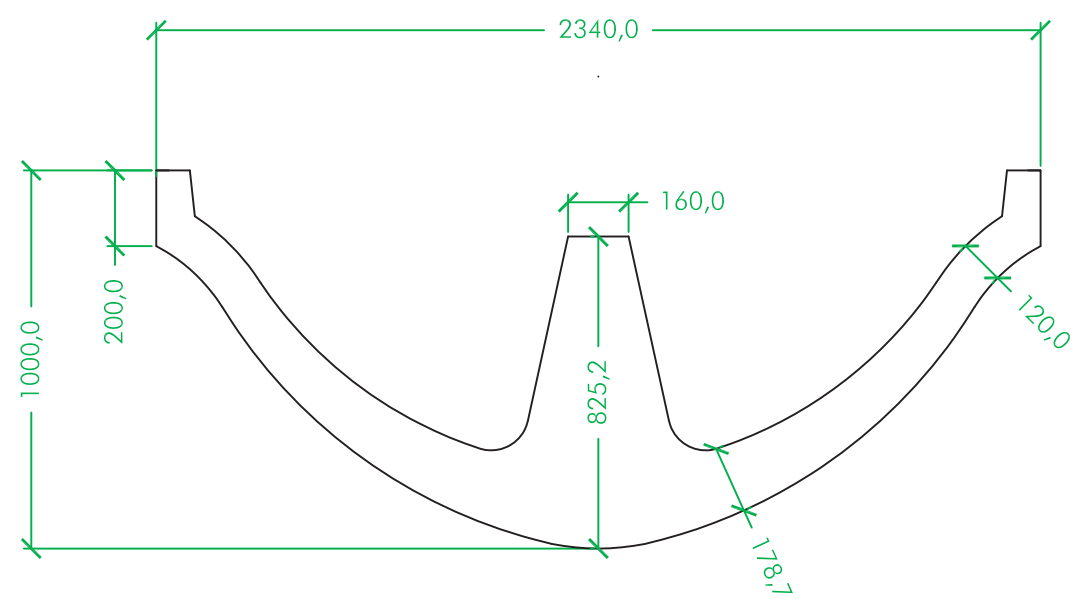


Figura 6-63 Secció inicial



Secció A (central)

Secció B

Secció C (suport)

Secció D (suport)

Figura 6-64 (esquerra) Plànols (e 1:20) de la placa d'UHPC tipus biga
 Figura 6-65 (dreta) Plànols (e 1:20) de la placa d'UHPC tipus arc

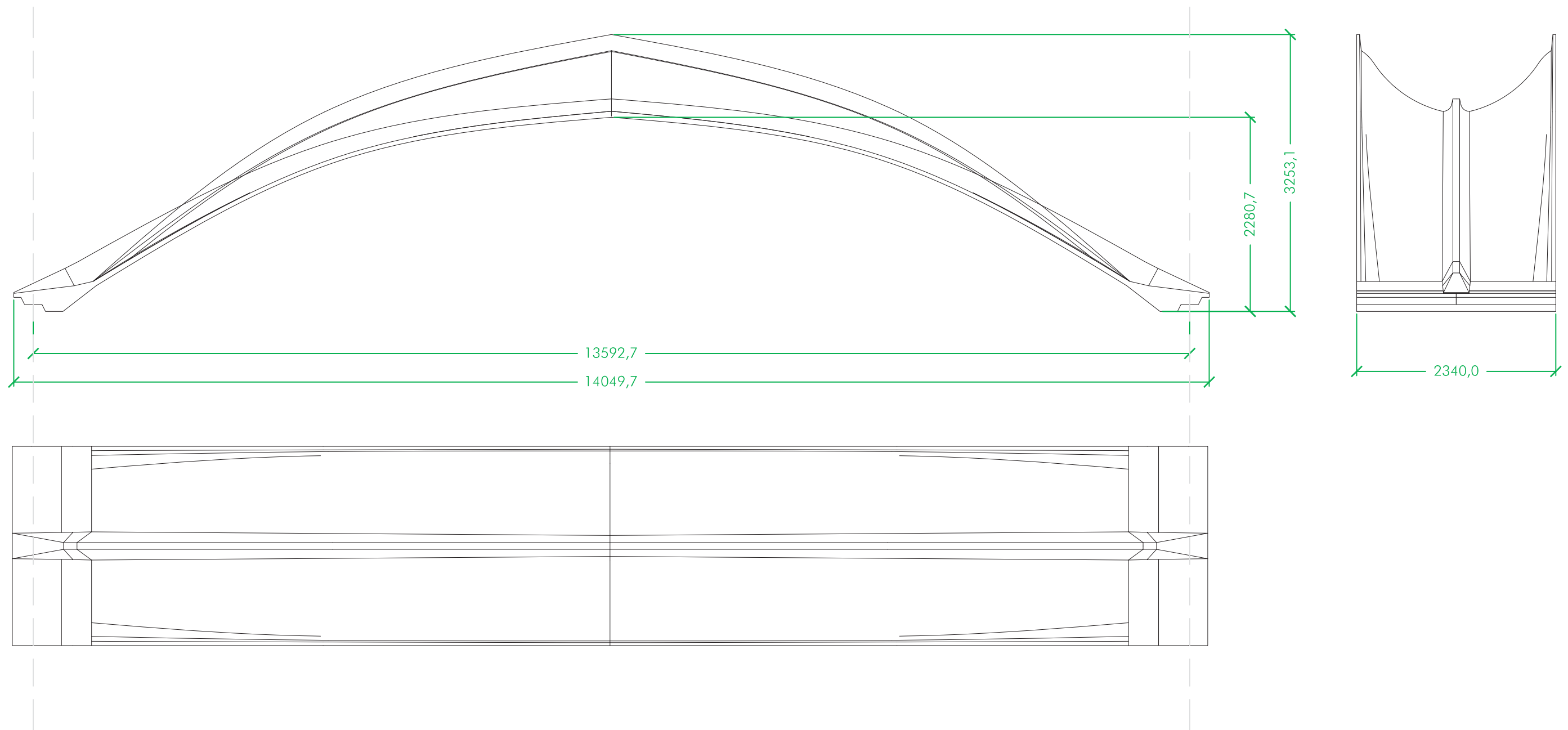


Figura 6-66 Plànols (e 1:50) de la placa d'UHPC (arc) amb les dimensions optimitzades.

Una de les diferències més importants, comparant les tres seccions, és el canvi de forma de la secció. Al projecte de l'estació se'ns mostrava una secció amb unes ales força rectilínies. A partir de l'estudi d'aquesta secció mitjançant criteris estructurals, i utilitzant ANSYS, la forma de la secció ha variat per a treballar de manera òptima: una secció amb gran quantitat de material a la part inferior per a resistir els esforços, i amb alçada per evitar la deformació vertical.

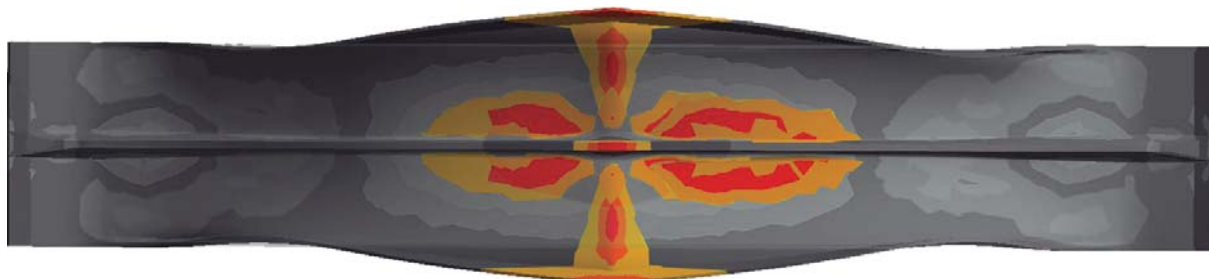


Figura 6-67 Diagrama d'esforços normals de la placa "arc". En taronja i vermell, les zones sotmeses a tracció.

Amb els diagrames d'ANSYS (vegeu annexos), gràcies al seu codi de colors, podem conèixer quins són els punts menys sol·licitats per a poder ubicar-hi els lluernaris. La figura 6-67 ens mostra els diagrames d'esforços normals en els tres eixos superposats (i també considerant una combinació amb càrregues de neu asimètriques) i es ressalten les zones traccionades. Aquestes es troben tan sols a la part superior de la biga, a l'entorn del nervi principal i del punt més alt. En aquestes àrees cal conservar la major àrea de la secció per tal que les traccions no augmentin, per la qual cosa no hi haurà lluernaris.

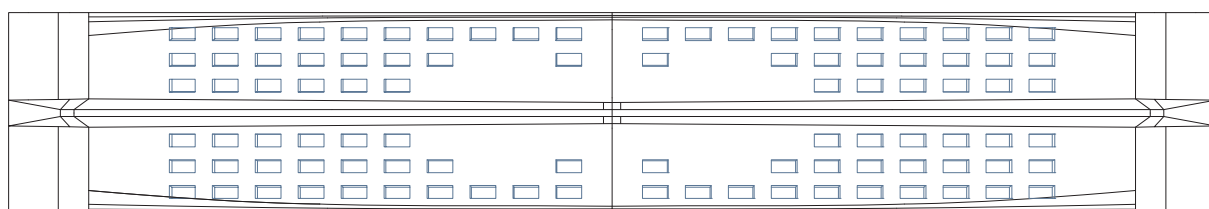


Figura 6-68 Planta de la placa amb els lluernaris.

Els diagrames d'esforços, en aquest cas, ens serveixen per donar un valor afegit molt important en aquest projecte però també donen llibertat a l'arquitecte, ja que els lluernaris es poden posar a qualsevol zona comprimida, sigui amb una configuració matricial i ordenada, o una de més aleatòria, com la que es mostra en les imatges propagandístiques de l'estació de Montpel·lier.

7.2 Conclusions

El disseny estructural és quelcom implícit en les obres d'arquitectura. Mentre que alguns projectes opten per l'aproximació a la forma a través de la creativitat i la plàstica (deixant el càlcul estructural com una comprovació de la integritat dels elements), altres projectes, com el cas que s'ha abordat en aquest treball, utilitzen les característiques del material i de la pròpia estructura per donar-li forma. Amb l'ús d'eines matemàtiques i, com s'ha vist, informàtiques, la forma dels elements estructurals es pot ajustar perquè compleixi uns requisits.

Malgrat que tot sembli un procés automàtic, l'arquitecte sempre ha de prendre decisions al respecte, ja que és qui defineix les variables de disseny, qui imposa les restriccions i qui, al final, escull

d'entre les possibles solucions que ens ofereix el programari, la que més li convé de manera que la forma final de l'element estructural sigui la més adequada segons la imatge desitjada i descrita a l'avantprojecte. L'arquitecte també té l'última paraula pel que fa als elements complementaris, com els lluernaris. Evitant les zones més sol·licitades estructuralment, l'arquitecte pot treballar sobre altres parts de l'element estructural i donar-li un valor afegit.

L'ús d'ANSYS ha estat molt útil per avaluar el comportament de la placa d'UHPC, un element estructural amb una geometria de grans dimensions i complexa. Ha descrit de manera exhaustiva i molt detallada el comportament de cada punt de la placa, que per l'UHPC són els punts comprimits, posant èmfasi en les dues característiques que més ens importaven: les tensions normals i la deformació vertical. Amb el mòdul d'optimització, introduint les variables de disseny desitjades i les restriccions necessàries, hem obtingut una geometria que respon de manera òptima a les càrregues a què aquesta placa està sotmesa. La secció principal final és una secció semicircular colocada en forma de canal. Col·locada d'aquesta manera, a més, té més estabilitat i guanya en usabilitat, ja que serveix, també, per a canalitzar l'aigua de la pluja cap als extrems.

També hem comparat el comportament de la mateixa placa amb condicions de contorn diferent. S'ha comprovat que els elements corbats tenen un rendiment màxim quan treballen com a arcs, que no deixen de ser elements constructius amb història, que s'utilitzaven per a suportar grans càrregues quan els edificis es construïen amb pedra. Fins i tot amb càrregues molt més petites, l'arc ha demostrat ser un element amb un comportament molt millor que la biga, ja que els esforços es transmeten seguint la trajectoria de la placa. Malauradament, les càrregues provoquen traccions en punts concrets de la placa, que apareixen per qüestions de deformació. Tot i això, els valors són molt més petits que les pròpies restriccions del material, per la qual cosa podem acceptar-los.

La disposició final dels lluernaris queda reservada a tota la zona sotmesa a esforços de compressió, però correspon a l'arquitecte la decisió de col·locar-los.

Pel que fa al material, s'ha vist que l'UHPC és un material amb un gran potencial i permet que aquesta geometria sigui possible. És un material ultraresistent i que l'armadura hi és present en forma de fibres, per la qual cosa els gruixos necessaris són mínims, fet que implica una menor quantitat de material i menor impacte econòmic, sobretot pel manteniment, sense sacrificar la integritat estructural. Per altra banda, requereix un treball de modelatge molt intens i difícil, ja que són peces exclusives pel projecte de l'estació i s'han de fer els motlles, estudiant la manera de fabricar la peça de la manera més homogènia possible, sense fer-ne parts separades.

L'ús de l'informàtica i dels recursos matemàtics en el disseny arquitectònic representa una aproximació a la forma d'una manera més científica i menys etèria, i respon a criteris exclusivament estructurals i materials, però que deixa que l'arquitecte prengui les decisions importants. No es tracta que l'ordinador generi una forma a partir d'algorismes i equacions, sinó que ens ajudi a resoldre estructuralment un projecte per a conferir-li integritat i bellesa, ja que una estructura òptima és també una estructura bonica.

7.3 Reptes de futur

Aquest treball mostra un dels resultats d'entre els múltiples que hi ha hagut durant els processos d'optimització, però sobretot ens mostra el potencial que té en arquitectura un material que, fins

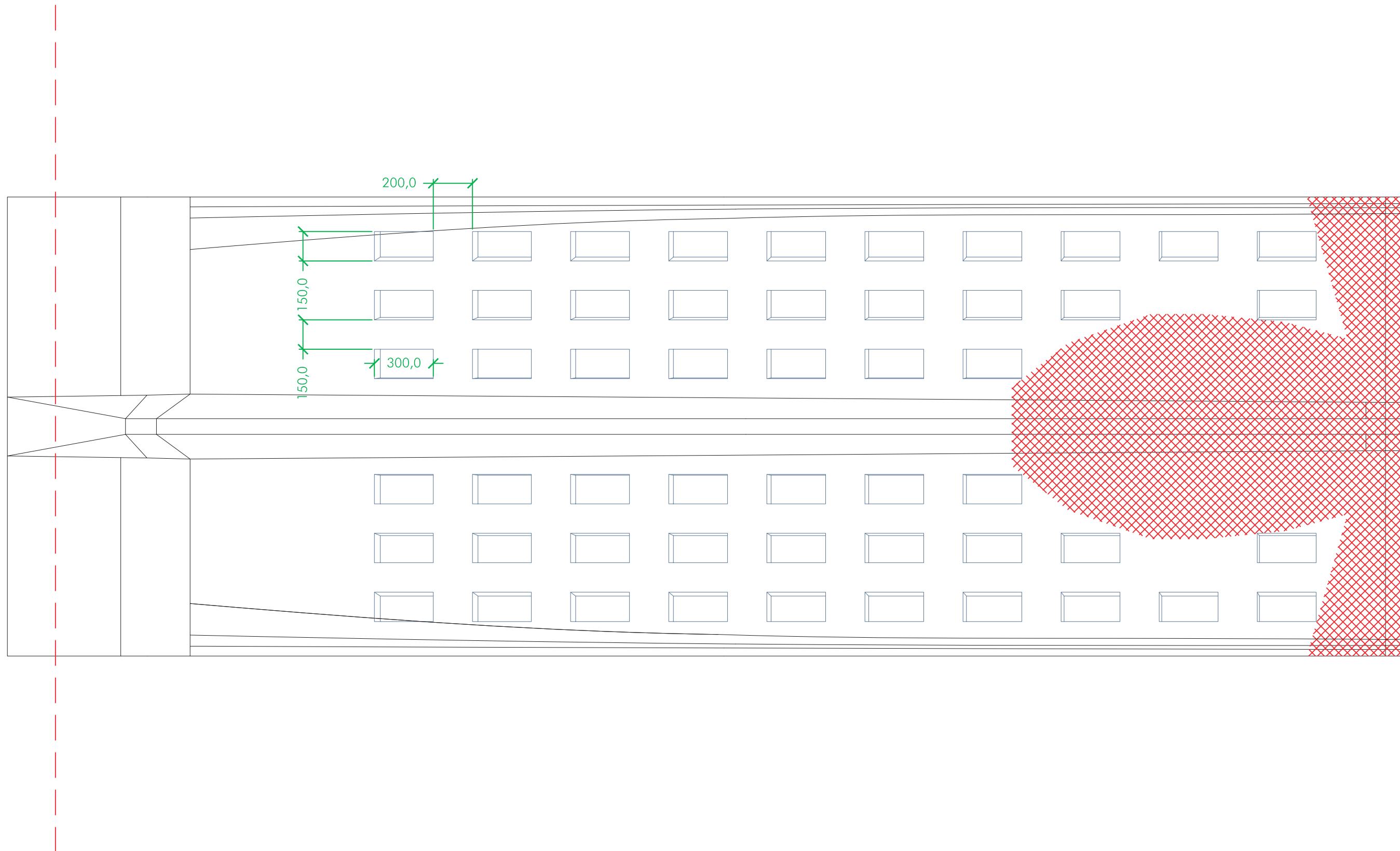


Figura 6-69 Planta (e 1:20) de la placa amb els lluernaris. En vermell, l'àrea sotmesa a esforços de tracció (on no hi aniran lluernaris).

ara, ha estat utilitzat en obres d'enginyeria. L'UHPC té molt de potencial. Aquest treball s'ha centrat en l'anàlisi d'una estructura ja proposada i dissenyada. Concretament, s'ha estudiat el comportament de la peça singular tipus d'UHPC, molt important en el projecte, ja que li dóna la imatge desitjada.

Tant el disseny global de l'estructura com el de cada un dels elements que la formen no poden considerar-se com exercicis suplementaris del projecte arquitectònic. Les decisions de l'arquitecte en qualsevol fase del disseny de l'obra repercuteixen, en major o menor mesura, sobre les parts que la configuren. Per això és important tenir present la geometria de cada peça i també les relacions entre elles.

El que ha quedat pendent ha estat trobar la forma òptima que fes que la peça treballés a compressió pura. Tot i que la geometria final és la que té les traccions mínimes, no les anul·la. Això és a causa de complexa geometria de la placa i de les grans dimensions que té, ja que la relació entre la longitud i l'alçada és massa petita. Com que el treball es basa en un projecte ja redactat, he considerat que el millor era treballar sobre la forma pensada. Tot i això, en un proper càlcul estructural fóra bo proposar una geometria diferent que, encara que canviés dràsticament la imatge, aprofités tot el potencial de l'UHPC. Caldria tenir present, però, que es necessitaria més volum de material i que podria fer augmentar el cost de l'obra.

A nivell d'ús de programari, una manera millor de generar la geometria hagués estat parametritzar tot el conjunt de la placa. D'haver estat així el programa hagués estat capaç de produir una altra geometria òptima, però hauríem hagut d'afrontar dos problemes: el primer, el fet de treballar amb una quantitat enorme de variables de disseny, ja que la placa és de secció variable i cada secció està definida per una sèrie de trams que generen el contorn; i el segon s'ha comentat anteriorment, que hauríem deixat a mans de l'ordinador la forma de la peça i només hauríem pogut restringir les variables de sortida (el comportament estructural). De totes maneres, hem pogut avaluar la proposta de coberta exportant la geometria a ANSYS i avaluant el comportament estructural.

8 Recursos

8.1 Fonts d'informació

Agkathidis, A. (2015). *Generative design*. London: Laurence King Publishing Ltd.

Association Française de Génie Civil. (2013). *Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes*.

Buitelaar, P. (2004). *International Symposium on Ultra High Performance Concret*. In *Heavy Reinforced Ultra High Performance Concrete* (pp. 25-35). Kassel: University of Kassel.

Fuller, R. & Applewhite, E. (1975). *Synergetics*. New York: Macmillan.

Fuller, R. & Applewhite, E. (1983). *Synergetics 2*. New York: Macmillan.

Gil Carrillo, F. *Evolución y consecuencias de las deformaciones en las estructuras de hormigón armado* (Tesi de màster). Universidad Politécnica de Madrid.

López Martínez, J. (2012). *Adaptación del modelo de comportamiento del Ultra high performance concrete (UHPC) para el estudio de la respuesta estructural y análisis numérico de una celosía* (Tesi de màster). Departamento de Ingeniería de la construcción y Proyectos de ingeniería civil, Universitat Politècnica de Valencia.

Olsson, J. (2012). *Form finding and size optimization. Implementation of beam elements and size optimization in real time form finding using dynamic relaxation* (Tesi de màster). Chalmers University of Technology.

Racky, P. (2004). *International Symposium on Ultra High Performance Concret*. In *Cost-effectiveness and sustainability of UHPC* (pp. 797-805). Kassel: University of Kassel.

Serra Fernandes, R. (2013). *Generative Design: a new stage in the design process* (Tesi de màster). Instituto Superior Técnico Lisboa.

Soler, J. (2013). *'Form finding' y fabricación digital en hormigón armado* (Tesi de màster). Universitat Politècnica de Catalunya.

Stokes, A. (1994). *Responses of young trees to wind: effects on root architecture and anchorage strength* (Doctorat). Departamento de Biología, Universidad de York.

Nouvelle gare. (2015). *Gare2-montpellier.com*. Retrieved 1 March 2016, from <http://www.gare2-montpellier.com/fr/nouvelle-gare>

UHPC Facade Panels - Raised Textures from TAKTL. (2016). *ArchDaily Materials*. Recuperat el 6 de març de 2016, from <http://www.archdaily.com/catalog/us/products/7061/uhpc-facade-panels-raised-textures-taktl>

8.2 Índex de figures

Figura 1-7 Models realitzats amb pel·lícules i bombolles de sabó.	20
Figura 1-8 Complex olímpic de Múnic 1972, de Frei Otto.	21
Figura 1-9 Arcs de mig punt de l'amfiteatre de Mèrida.	21
Figura 1-10 Interior de la Catedral de Santa Maria de Girona.	21
Figura 1-11 Model funicular de la colònia Güell.	22
Figura 1-12 Gateway Arch (1965), St. Louis, Missouri.	22
Figura 1-13 Mercat de Porto Alegre, 1974, dissenyat per Eladio Dieste.	23
Figura 1-14 Restaurant submarí de l'Oceanogràfic.	23
Figura 1-15 Mannheim Multihalle, dissenyat i construït per Frei Otto.	24
Figura 2-16 Interior de l'estadi	26
Figura 2-17 Vista de la façana	26
Figura 2-18 Exterior de l'estadi	26
Figura 2-19 Façana de «The Atrium»	27
Figura 2-20 Vista exterior	27
Figura 2-22 Banc del Bar Agricole, a San Francisco.	28
Figura 2-23 Terrassa del MuCEM.	28
Figura 2-24 L'UHPC permet construir voladissos amb cantells molt prim.	28
Figura 2-25 Pont del MuCEM.	29
Figura 2-26 Fotografia del pont a Bourg-lès-Valance	29
Figura 2-27 Secció longitudinal	29
Figura 2-28 Secció transversal del pont del riu Fulda, a Kassel (Alemanya)	30
Figura 2-29 Model 3D: es mostren els suports i la geometria de l'estructura del pont.	30

Figura 2-30 Estructura per a una estació de servei (1968), dissenyada per Heinz Isler	30
Figura 3-31 Estació de Montepellier Saint Roch.	35
Figura 3-32 Vista aèria (virtual) de la nova estació.	36
Figura 3-33 Vista (virtual) a peu de carrer.	36
Figura 3-34 Vista interior (virtual)	37
Figura 3-35 Vista interior (virtual)	37
Figura 3-36 Secció transversal de l'estació.	39
Figura 3-37 Secció longitudinal de l'estació.	41
Figura 3-38 (a dalt) Planta de l'estructura.	43
Figura 3-39 (a sota) Pòrtic principal de l'estructura.	43
Figura 3-40 Secció longitudinal i planta d'una placa d'UHPC.	44
Figura 3-41 Detall de la secció longitudinal. Suport de les plaques d'UHPC a les jàsseres.	44
Figura 3-42 En verd, les jàsseres perimetrals. En vermell, les jàsseres centrals.	46
Figura 4-43 Consum d'energia i matèries primeres per classe de formigó.	49
Figura 4-46 Gràfic deformació-tensió d'un assaig d'UHPC amb fibres d'acer.	51
Figura 4-47 Relació entre la resistència a la compressió i el mòdul de Young.	51
Figura 4-49 El volum adsorbit per l'UHPC [...]	53
Figura 5-50 Imatge 3D de la biga d'UHPC	57
Figura 5-51 Vista frontal acotada de la biga d'UHPC 2.340 mm.	57
Figura 5-52 Biga amb secció optimitzada.	59
Figura 6-53 Què és un problema d'optimització?	61
Figura 6-54 El procés constructiu en arquitectura	62
Figura 6-55 Gràfic d'un problema d'optimització.	63

Figura 6-56 Seccions que defineixen la geometria de la biga.	64
Figura 6-57 Seccions i definició dels paràmetres d'entrada.	66
Figura 6-58 Afectació de les condicions de contorn en elements corbats: biga i arc.	69
Figura 6-59 Simulacions de deformació de la placa.	69
Figura 6-60 Comparació entre biga corbada i arc.	70
Figura 6-61 Plànol (e 1:50) de les noves seccions	71
Figura 6-62 Matriu de correlació de les variables de disseny.	73
Figura 6-63 Secció inicial	75
Figura 6-64 Plànols (e 1:20) de la placa d'UHPC tipus biga	77
Figura 6-65 Plànols (e 1:20) de la placa d'UHPC tipus arc	77
Figura 6-66 Plànols (e 1:50) de la placa d'UHPC (arc) amb les dimensions optimitzades.	79
Figura 6-67 Diagrama d'esforços normals de la placa "arc".	81
Figura 6-68 Planta de la placa amb els lluernaris.	81
Figura 6-69 Planta (e 1:20) de la placa amb els lluernaris.	83

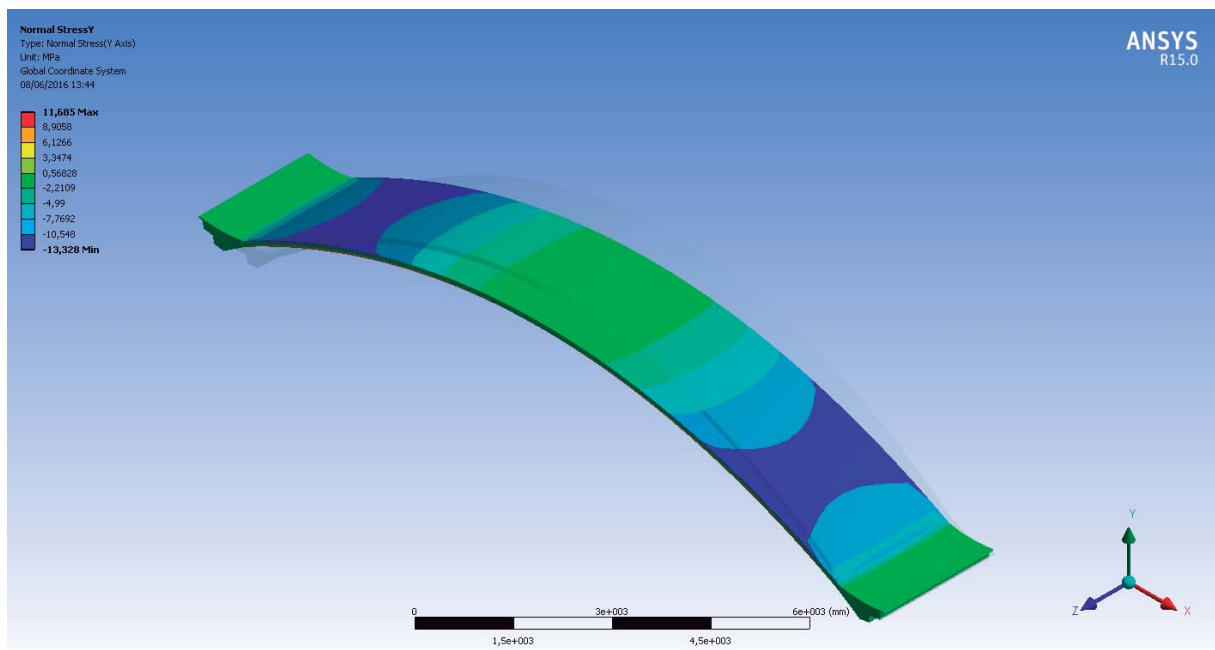
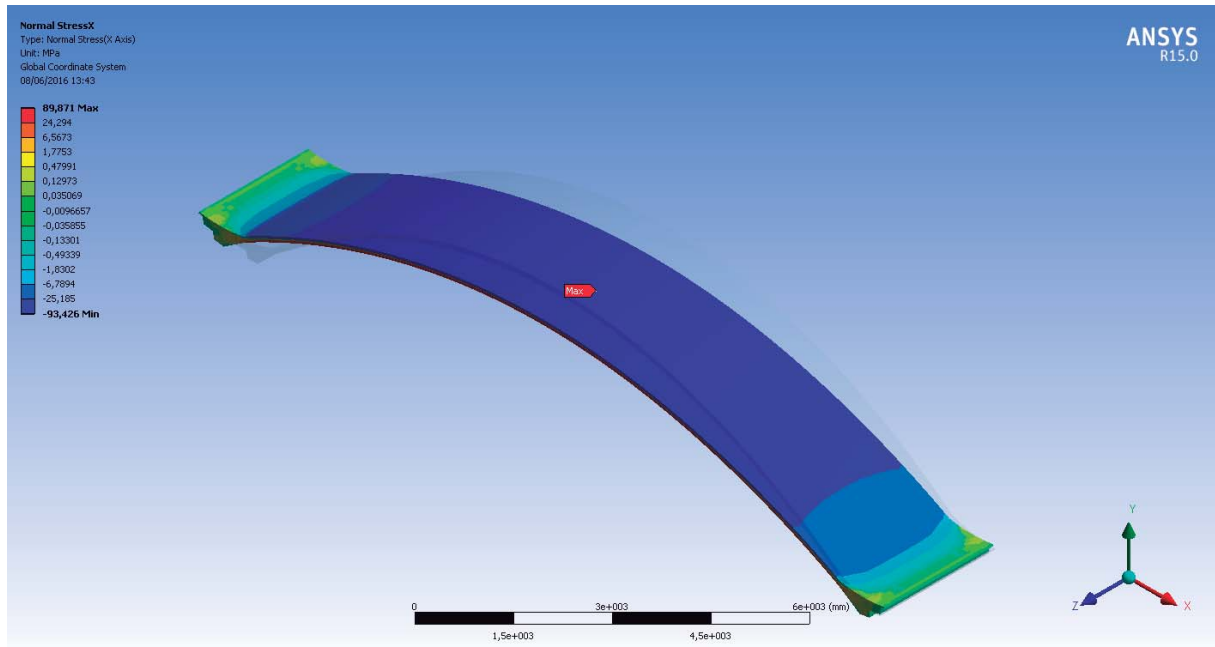
8.3 *Índex de taules*

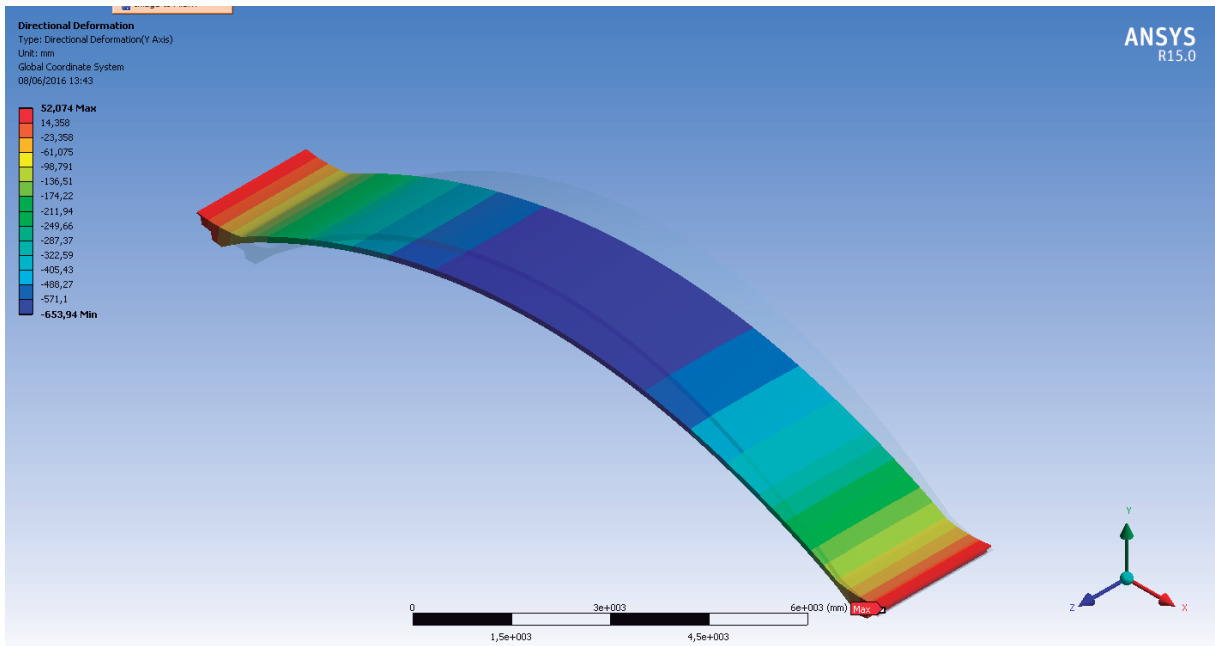
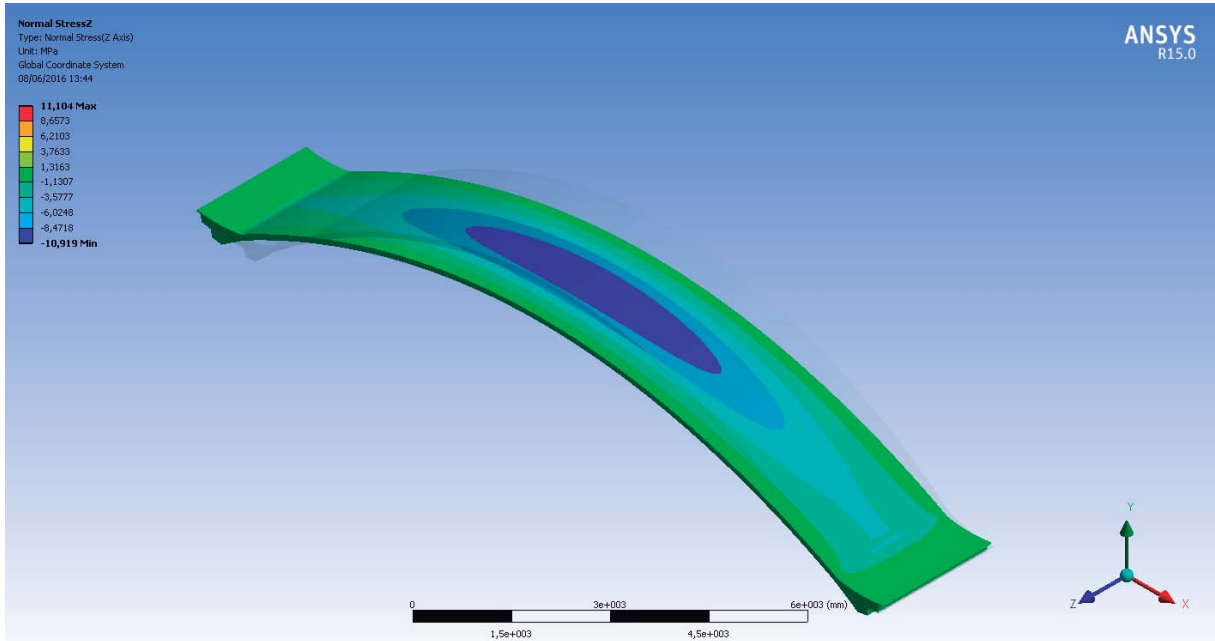
Taula 1.	Taula d'elements estructurals en la coberta de la nova estació de Montpellier	43
Taula 2.	Consum d'energia i matèries primeres per a un pilar de formigó armat.	46
Taula 3.	Taula de quantitats de referència en la composició d'UHPC.	48
Taula 4.	Característiques mecàniques de materials de construcció habituals.	51
Taula 5.	Estat de càrregues.	53
Taula 6.	Quantitat de material en la mescla d'UHPC.	54
Taula 7.	Proporcions dels diferents materials.	54
Taula 8.	Resultat de l'anàlisi amb ANSYS.	56
Taula 9.	Resultat del segon anàlisi amb ANSYS.	57
Taula 10.	Valors dels paràmetres d'entrada i sortida de 8 anàlisis.	62
Taula 11.	Paràmetres d'entrada (segona optimització)	63
Taula 14.	Paràmetres de sortida (segona optimització).	64
Taula 15.	Paràmetres d'entrada (segona optimització)	65
Taula 16.	Resultats del procés d'optimització de la placa "biga".	65
Taula 17.	Tensions màximes i mínimes en els tres eixos	66
Taula 18.	Intervals de parametrització per a la placa "arc"	69
Taula 19.	Resultats del procés d'optimització de la placa "arc".	70
Taula 20.	Massa i volum de les plaques amb les dimensions dels punts candidats 1 i 4.	72

9 Annexos

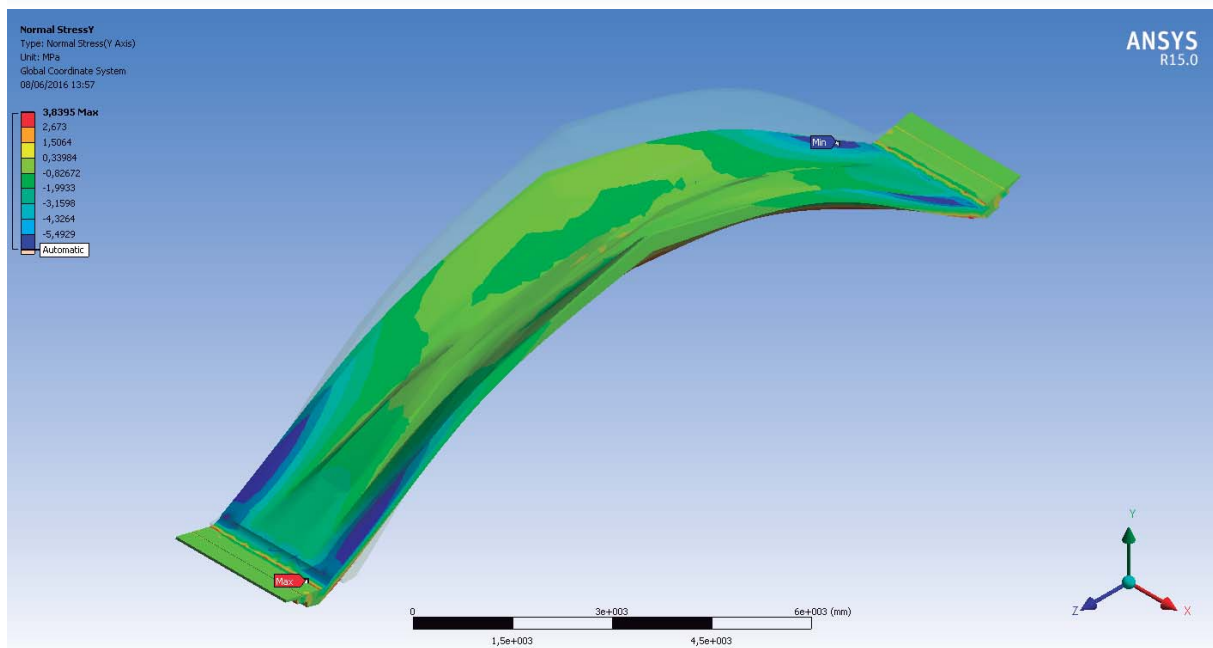
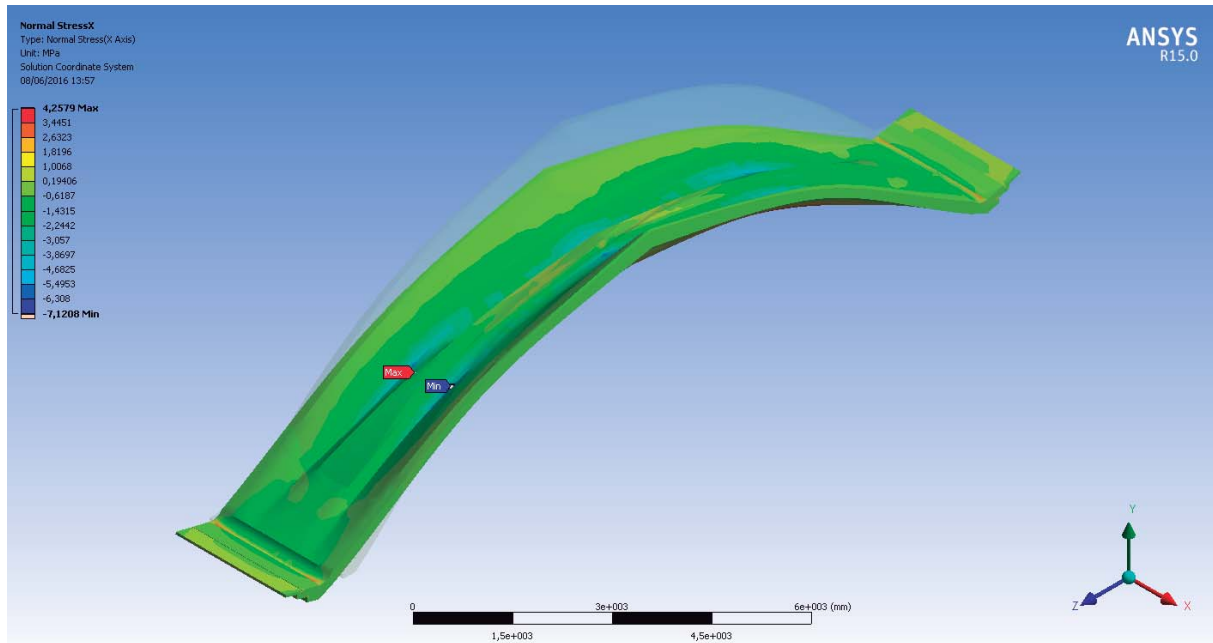
9.1 Resultats dels anàlisis amb ANSYS

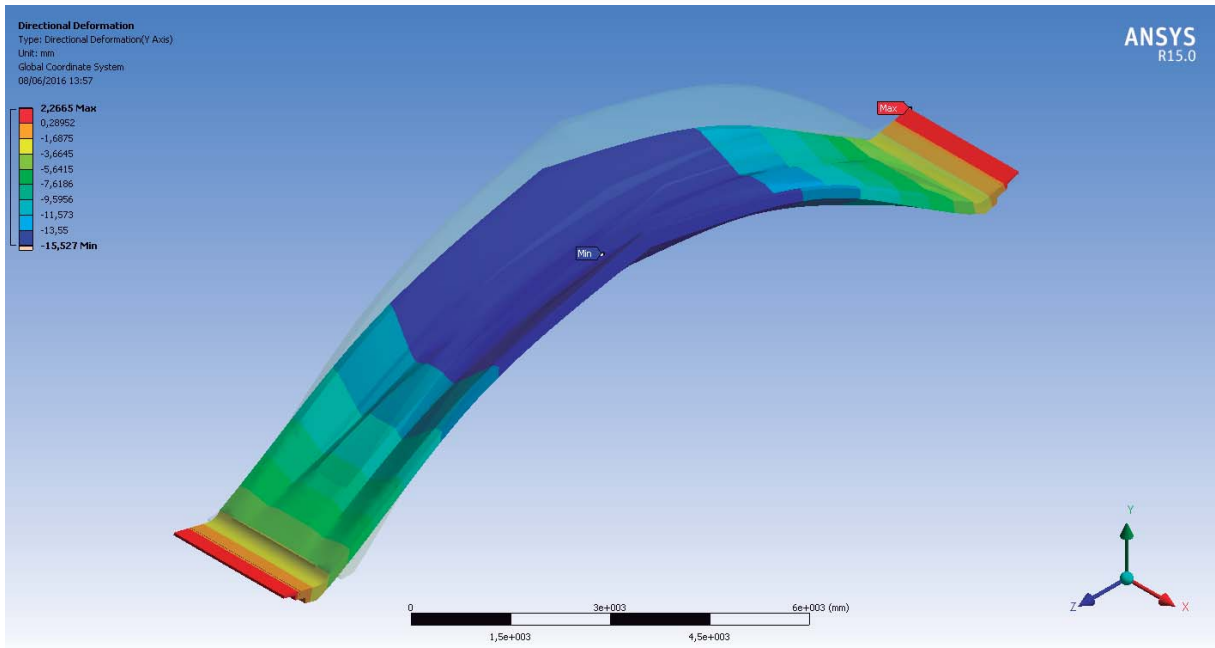
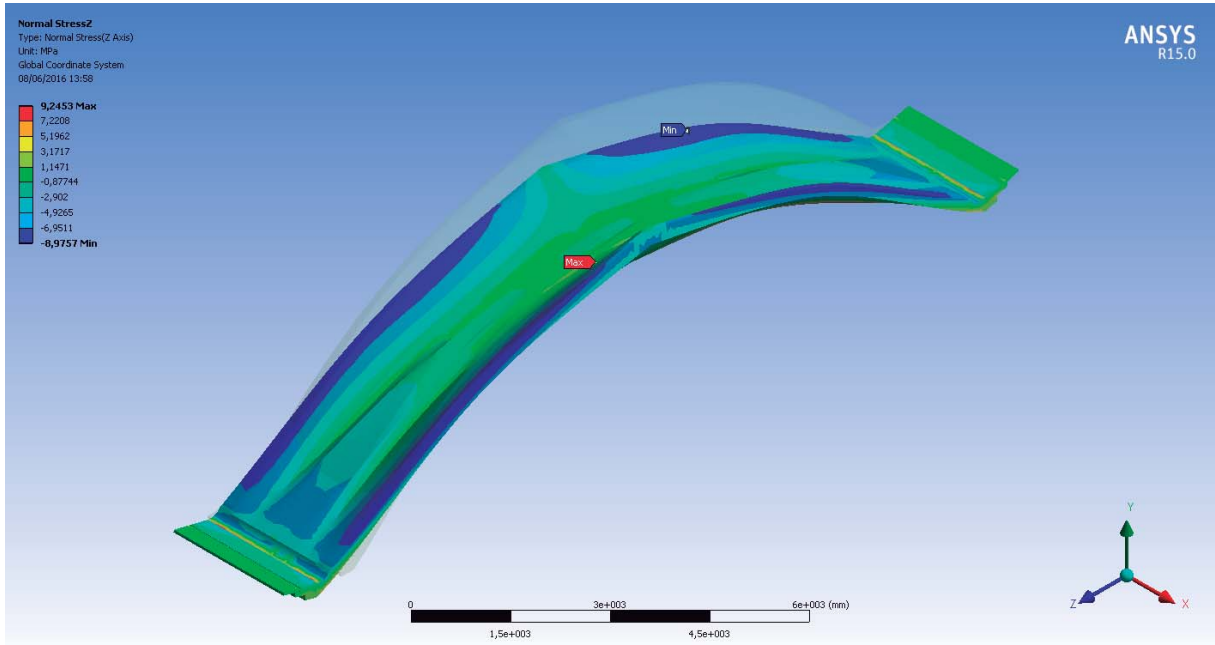
9.1.1 Primer anàlisi (introducció a ANSYS)



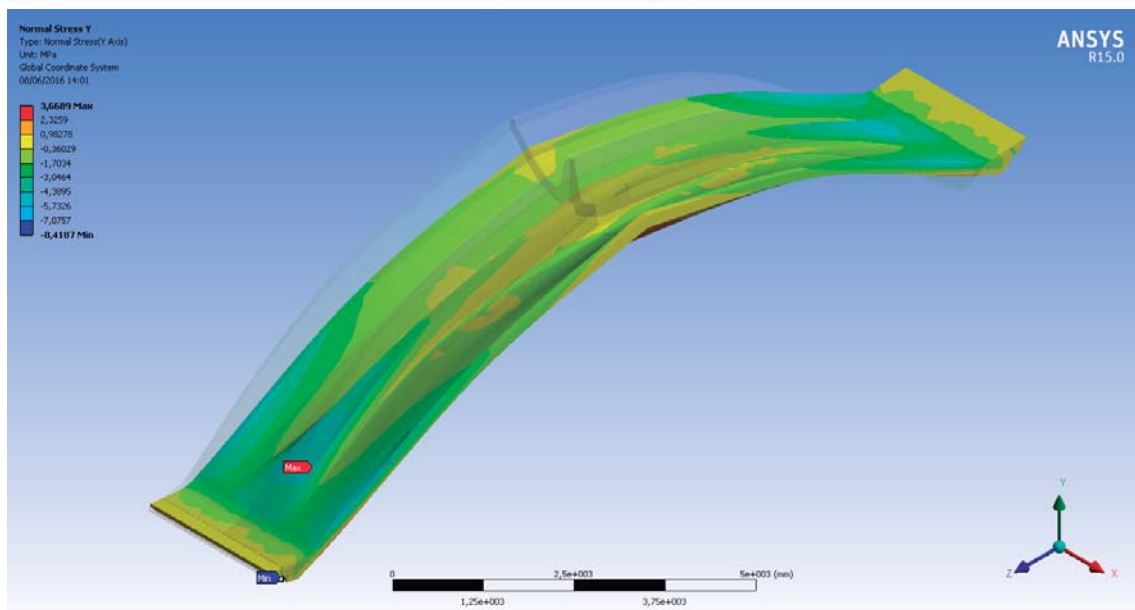
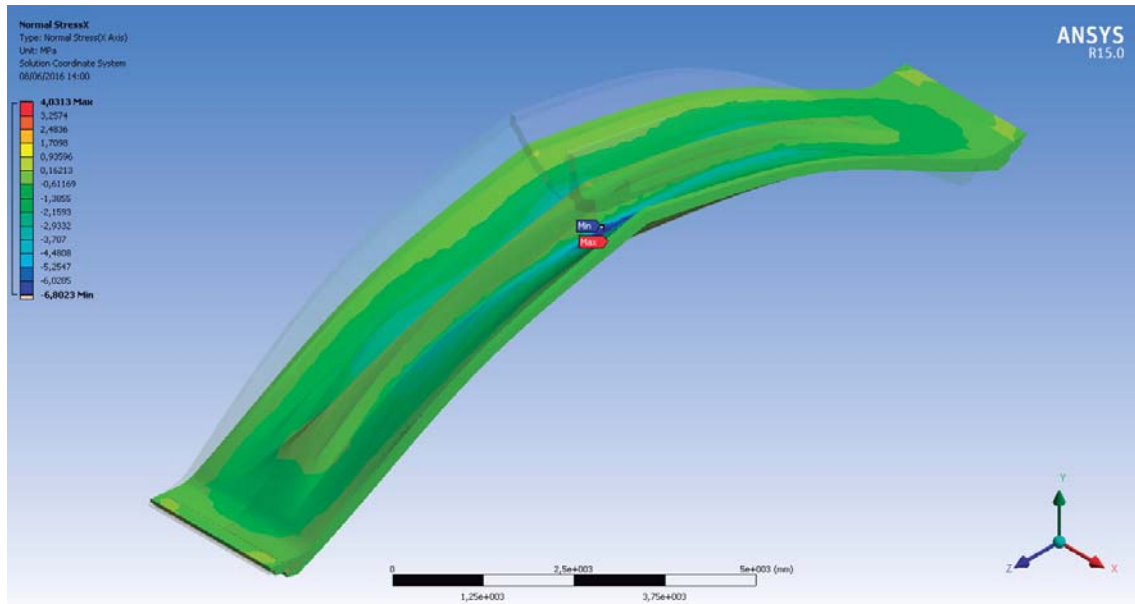


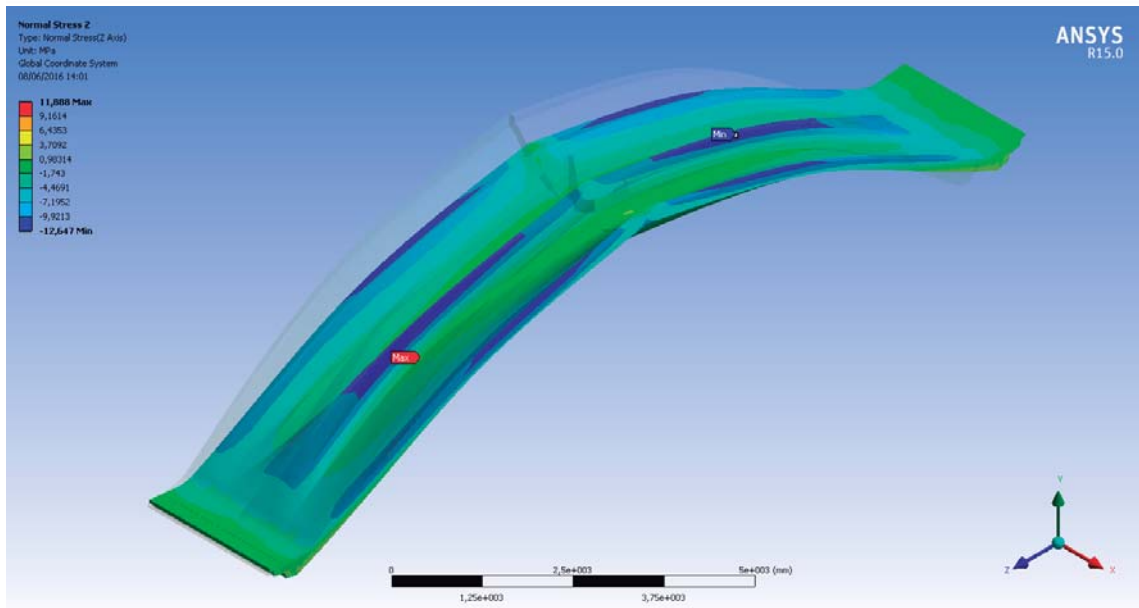
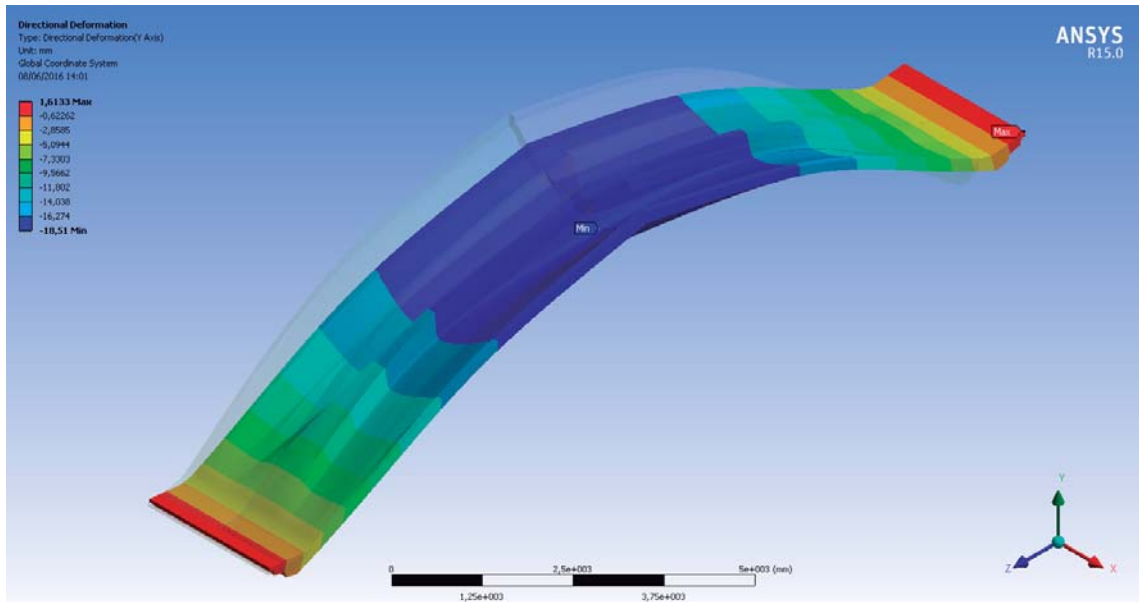
9.1.2 Segon anàlisi (primera optimització)



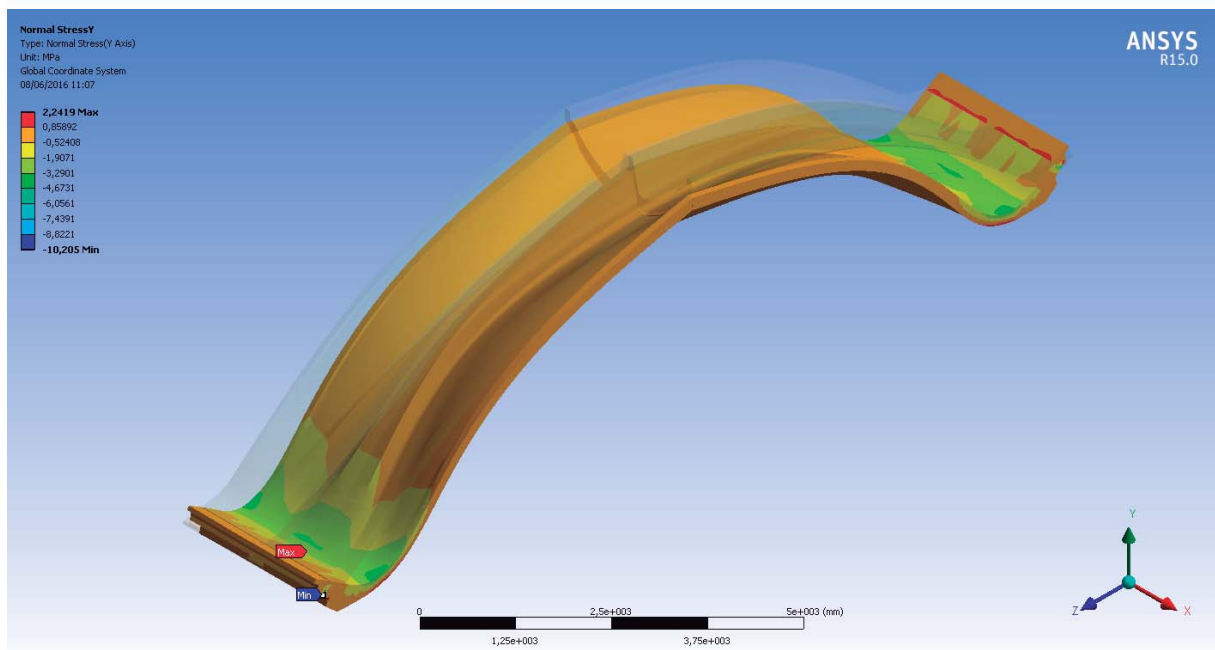
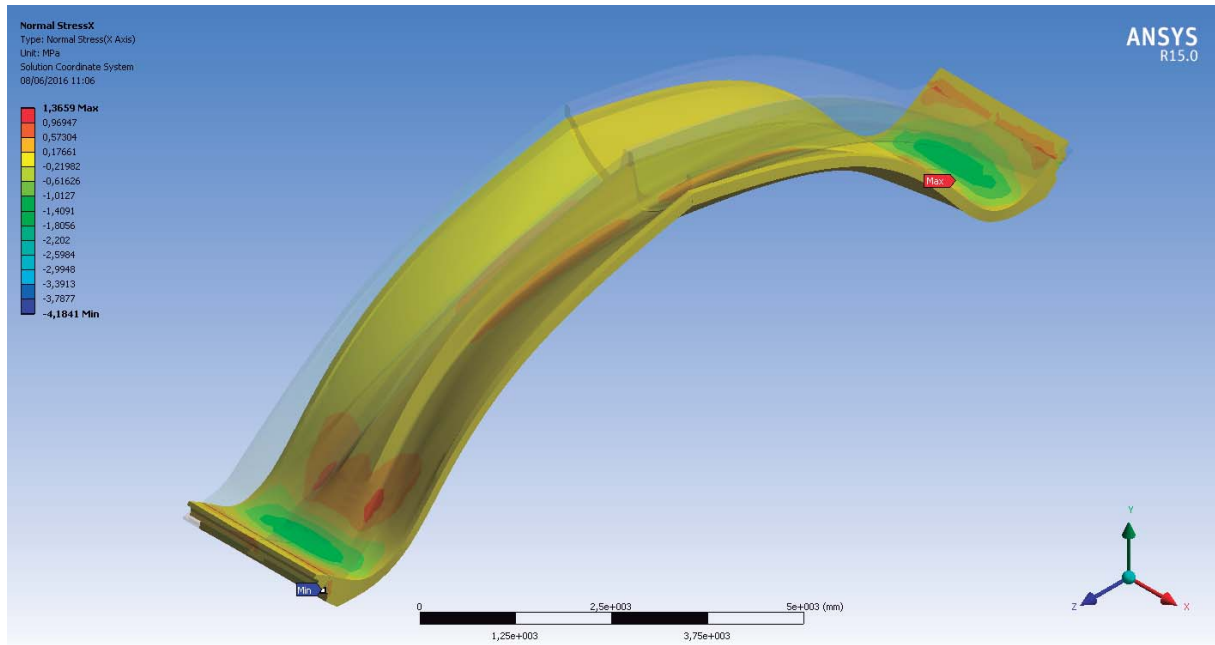


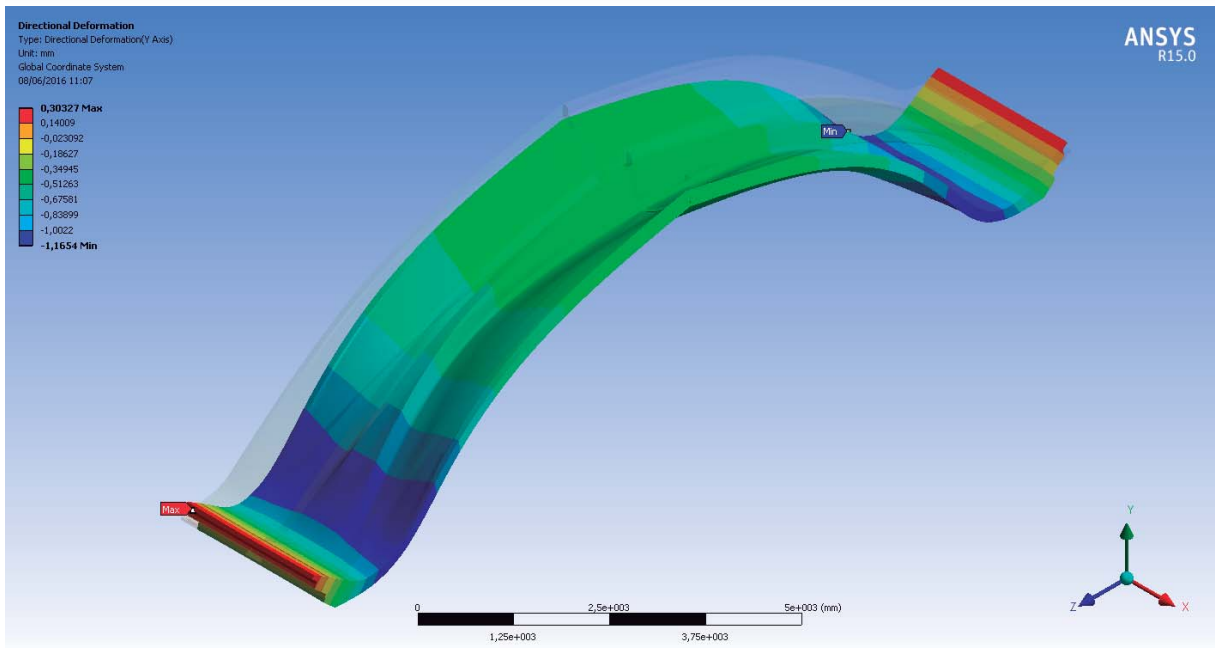
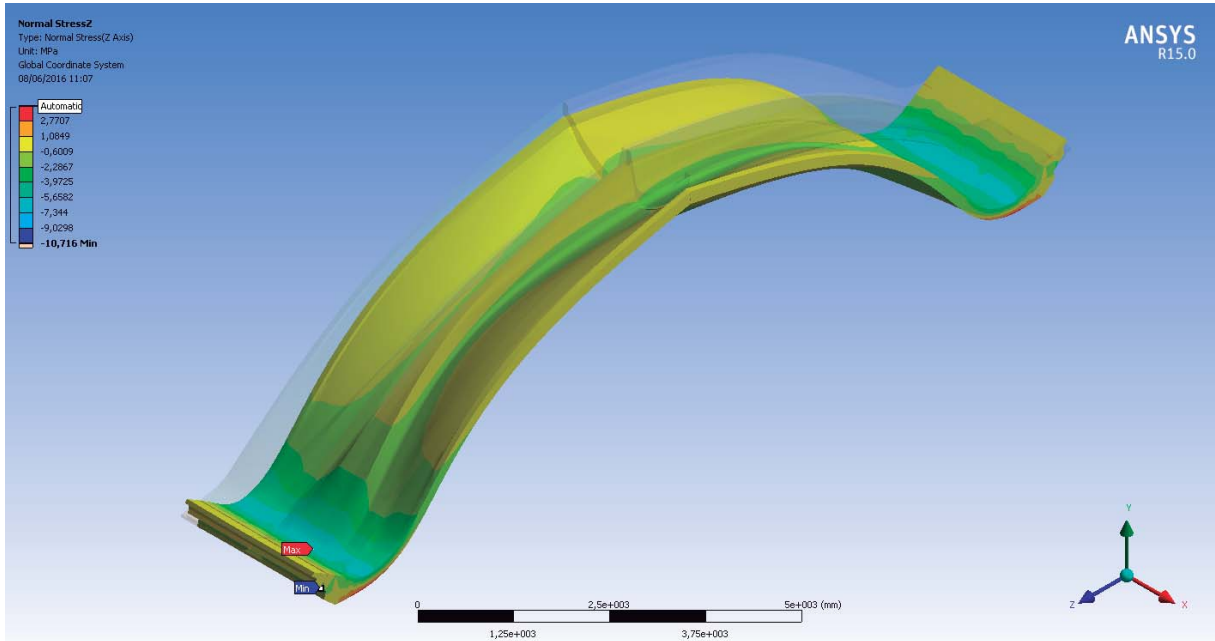
9.1.3 Tercer anàlisi (segona optimització)



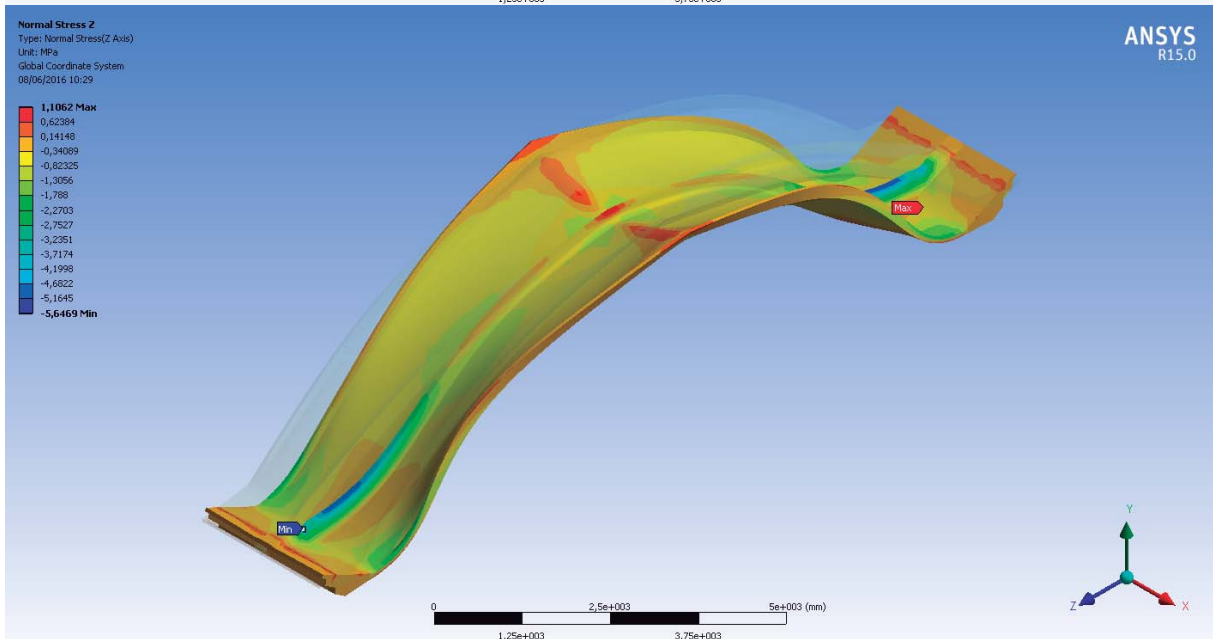
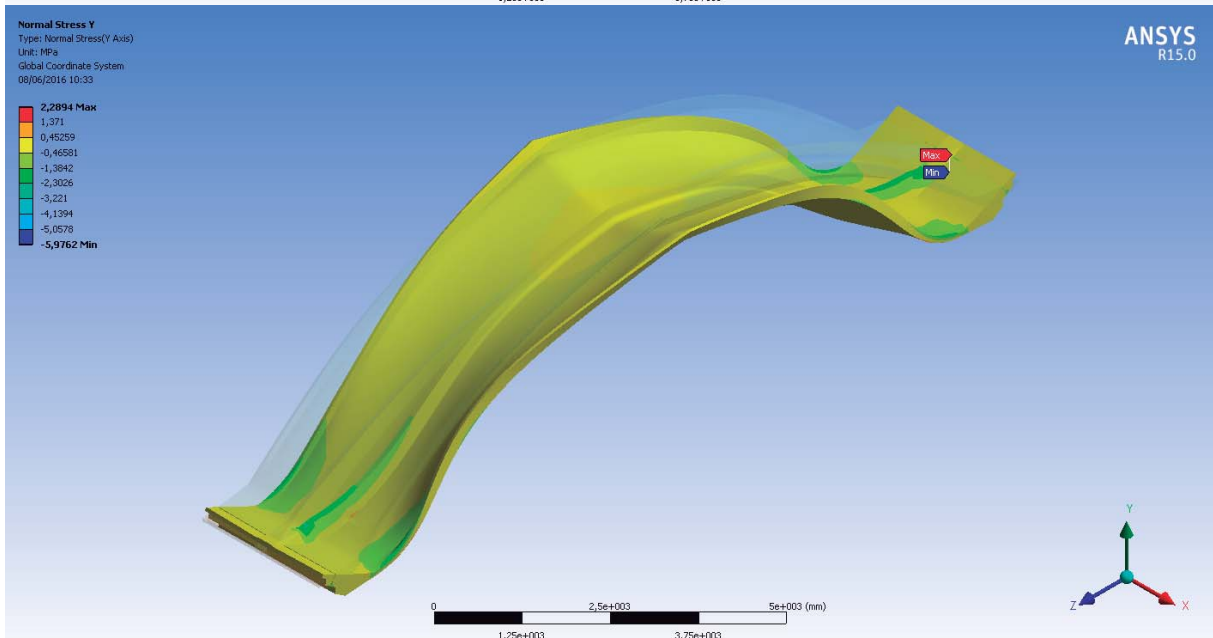
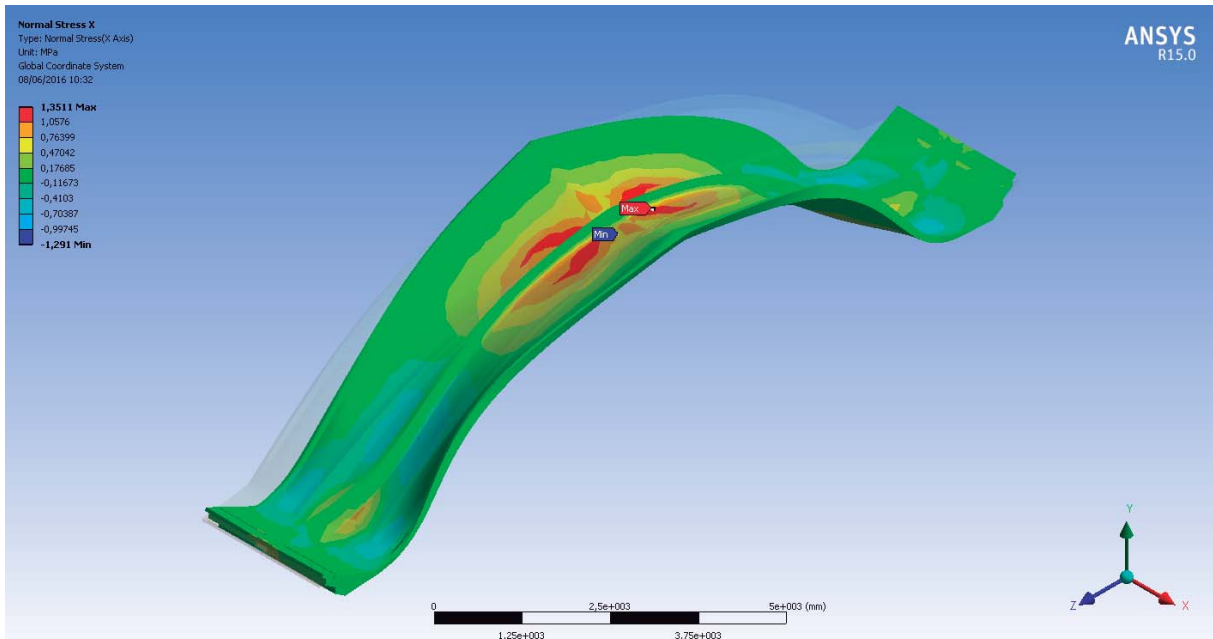


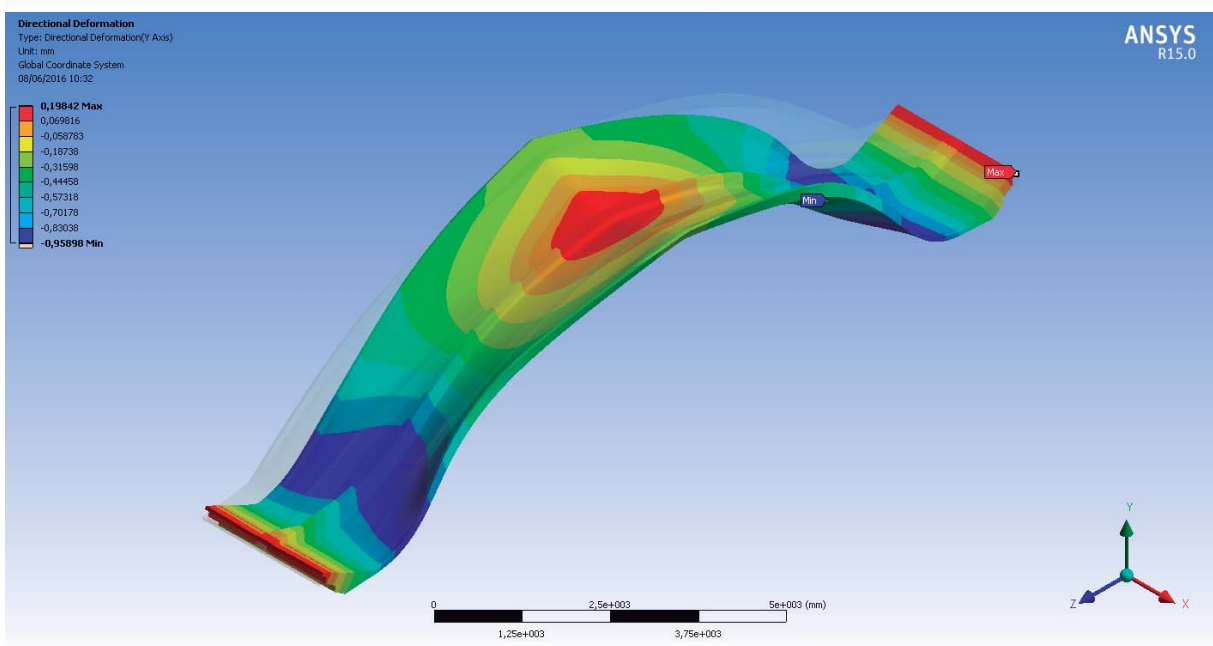
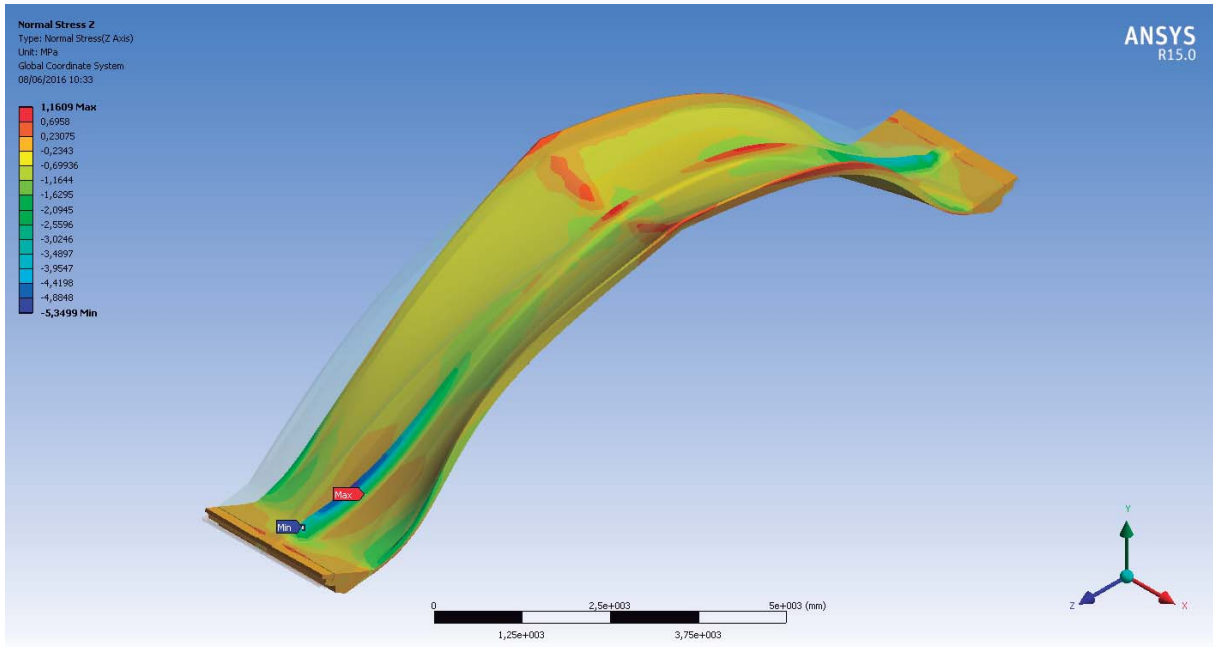
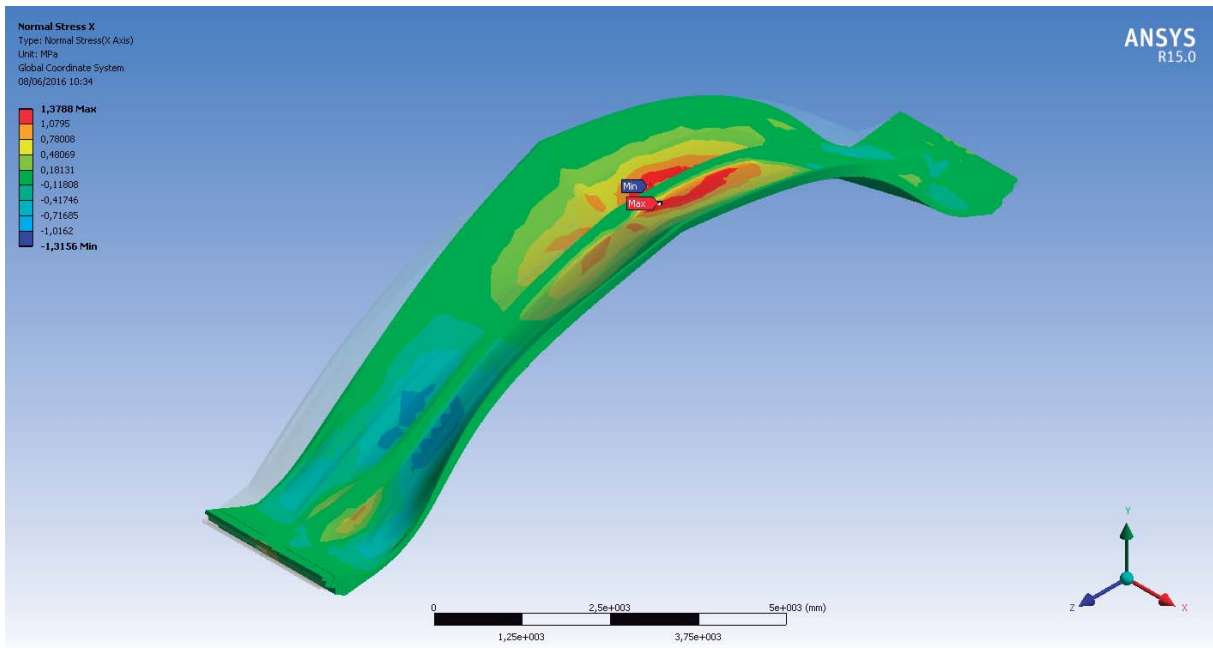
9.1.4 Quart anàlisi (canvi de condicions de contorn)





9.1.5 Cinquè anàlisi (tercera optimització)





9.1.6 Sisè anàlisi (final, placa amb lluernaris)

