

Treball de recerca

L'arc catenari

La solució arquitectònica de la naturalesa

2n de Batxillerat, C

EDUCEM

Granollers, 28 de Novembre de 2013

AGRAÏMENTS

Primerament, vull agrair el suport de la meva tutora V.G i de la Marta.

Gràcies a vosaltres per compartir aquesta passió que sento per el món de l'arquitectura i donar-me suport per continuar endavant, treien el millor que hi ha en mi. A tu Marta, per ajudar-me a encaminar aquest treball quan no veia res clar. I a tu V.G, per portar aquest treball amb mi, per innovar amb noves idees i sobretot per estimular les ganes de conèixer aquest món més profundament.

Als meus amics, vosaltres que, tot i ser pesat, m'heu escoltat parlar amb fascinació del meu treball a qualsevol hora del dia.

I també gràcies a la meva família. Al meu pare i la meva mare, per estar sempre allà ajudant-me quan els hi era possible. Però sobretot, gràcies al meu tiet Paco per la seva inesgotable i infinita paciència a l'hora de realitzar la part pràctica.

Gràcies a tots vosaltres.

*“Per fer les coses bé cal:
primer l’amor, segon la tècnica”*

Antoni Gaudí

ÍNDEX

| | | |
|--------|---|----|
| I. | INTRODUCCIÓ | 6 |
| II. | MARC TEÒRIC..... | 8 |
| 1. | L'ARC | 9 |
| 1.1. | COMPONENTS D'UN ARC | 9 |
| 1.2. | CONSTRUCCIÓ DE L'ARC..... | 10 |
| 1.2.1. | CONSTRUCCIÓ DE L'ARC AMB DOVELLES | 10 |
| 1.2.2. | CONSTRUCCIÓ D'UN ARC AMB TOTXANES | 12 |
| 1.3. | TIPUS D'ARCS..... | 14 |
| 1.3.1. | ARC DE MIG PUNT | 14 |
| 1.3.2. | ARC REBAIXAT | 14 |
| 1.3.3. | ARC ESCARSER | 15 |
| 1.3.4. | ARC OGIVAL O GÒTIC | 16 |
| 1.3.5. | ARC DE FERRADURA | 17 |
| 1.3.6. | ARC CONOPIAL | 17 |
| 1.3.7. | ARC CARPANELL | 17 |
| 1.3.8. | ARC TUDOR..... | 18 |
| 1.3.9. | ARC RAMPANT..... | 18 |
| 1.4. | FORCES | 19 |
| 2. | L'ARC CATENARI | 21 |
| 2.3. | CORBA CATENARIA..... | 21 |
| 2.3.1. | EQUACIÓ MATEMÀTICA..... | 22 |
| 2.3.2. | DIFERÈNCIA ENTRE LA CATENÀRIA I LA PARÀBOLA | 23 |
| 2.4. | CONSTRUCCIÓ DE L'ARC CATENARI | 24 |
| 2.5. | FORCES | 25 |
| 3. | ANTONI GAUDÍ I L'ARC CATENARI..... | 27 |
| 3.1. | LA RECERCA D'UN ESTIL PROPI | 27 |
| 3.2. | L'ARC CATENARI | 29 |
| 3.3. | OBRES DE GAUDÍ..... | 32 |
| 3.3.1. | EL CAPRICHÓ | 32 |
| 3.3.2. | PALACIO EPISCOPAL DE ASTORGA | 32 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 3.3.3. | LA FINCA GÜELL..... | 33 |
| 3.3.4. | EL PALAU GÜELL..... | 33 |
| 3.3.5. | ESCOLA DE LES TERESIANES | 34 |
| 3.3.6. | CASA BATLLÓ..... | 35 |
| 3.3.7. | CASA MILÀ..... | 36 |
| 3.3.8. | LA SAGRADA FAMÍLIA..... | 38 |
| 4. | APLICACIONS DE L'ARC CATENARI | 41 |
| 4.1. | AVANTATGES I DESVENTATGES | 41 |
| 4.2. | OBRES MODERNES AMB L'ARC CATENARI..... | 41 |
| 4.2.1. | CATENARIA EN PONTS..... | 42 |
| 4.2.1.1. | VIADUCTE EMBASSAMENT DE CONTRERAS..... | 42 |
| 4.2.1.2. | GOLDEN GATE | 42 |
| 4.2.2. | BODEGA YSIOS..... | 43 |
| 4.2.3. | OCEANOGRÀFIC..... | 43 |
| 4.2.4. | UMBRACLE. | 44 |
| 4.2.5. | ESGLÉSIA DE SAN FRANCISCO | 44 |
| 4.2.6. | GATEWAY ARCH | 45 |
| III. | MARC PRÀCTIC..... | 46 |
| 0. | INTRODUCCIÓ..... | 47 |
| 1. | CONSTRUCCIÓ DELS ARCS..... | 48 |
| 1.1. | ARC DE MIG PUNT | 48 |
| 1.1.1. | CÀLCULS PREVIS | 48 |
| 1.1.2. | ARC DE MIG PUNT DE SABÓ | 49 |
| 1.1.3. | ARC DE MIG PUNT DE FANG REFRACTARI..... | 52 |
| 1.2. | ARC CATENARI..... | 59 |
| 2. | ENTREVISTA A LA SAGRADA FAMÍLIA..... | 64 |
| IV. | CONCLUSIONS..... | 66 |
| V. | NOVES VIES DE RECERCA I PROPOSTES DE MILLORA..... | 68 |
| VI. | BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA | 69 |



I. INTRODUCCIÓ

“Em van preguntar per què feia columnes inclinades, al que vaig contestar: per la mateixa raó que el caminant cansat, en aturar, s’apuntala amb el bastó inclinat, ja que si es posés vertical, no descansaria.”

ANTONI GAUDÍ.

L’arquitectura és un dels trets que ens ajuda a marcar i identificar cada etapa de la història de la humanitat, ja sigui des dels primers tòtems construïts fins als edificis més actuals amb les formes més extravagants. Un d’aquests estils, és el Modernisme Català, del qual l’arquitecte Antoni Gaudí era el màxim exponent.

Una nit, veient un documental sobre el Modernisme i Gaudí, van sorgir les paraules **arc catenari**. Per mera curiositat, vaig preguntar a professors i al meu pare què era aquest arc que mai havia escoltat. L’únic coneixement que vaig adquirir va ser que aquest, no necessitava contraforts. Paral·lelament, encara persistia el dubte que quasi tothom tenia en aquell moment del batxillerat; de què puc fer el Treball de Recerca? Alguns temes van passar pel meu cap, però cap d’ells m’estimulava suficient com per a dedicar un any de treball. Vista la situació, vaig pensar en fer un treball relacionat amb el món de l’arquitectura, la carrera que m’agradaria fer després dels estudis de batxillerat. I instantàniament em va venir al cap l’arc catenari. El més abans possible vaig parlar amb la Marta, arquitecte que impartia les classes d’AutoCad de l’escola i la V.G, la meua professora de Dibuix Tècnic i també tutora d’aquest treball, per veure si el tema seria viable, i per sort, ho era. Un cop donat el vistiplau, vaig realitzar una recerca una mica més profunda per saber què era exactament i a què es devia aquest comportament tan particular que presentava respecte als típics arcs que tothom coneix, com el de mig punt utilitza’t en el Romànic o l’arc apuntat en el Gòtic. A conseqüència, aquesta petita investigació em servia per començar a estructurar el que seria l’índex del meu treball.

L’arc catenari era diferent de tots els altres. Aquest es formava a partir de la inversió de la catenari, la forma que adopta una cadena que penja de dos punts. Gràcies al fet esmentat, permetia la seva construcció sense contraforts als murs per evitar que s’obrís o es trenqués. Però durant aquesta coneixedora investigació, vaig fixar-me que havia estat utilitzat majoritàriament, per no dir únicament, per l’arquitecte català en les seves obres.



Fet que em va estranyar, atès que no entenia com un arc tan especial i amb aquesta propietat, no s'havia espremut el seu suc anys enrere, on la tecnologia ja estava més avançada. Aquesta pregunta va ser l'estímul que va despertar la curiositat en mi per investigar sobre aquest element arquitectònic i, el que va ajudar a delimitar el que seria l'objectiu principal d'aquest treball: **Buscar el perquè de la no utilització d'aquest arc tot i les avantatges de les quals aquest disposa.**

A més, un altre aspecte que em va cridar molt l'atenció, va ser el seu desconeixement. En el moment que em disposava a explicar a algú de què tractava el meu Treball de Recerca, la primera reacció era d'incomprensió vers el nom "arc catenari", a més de no saber què és. Aquella gent que estava més ficada en el món de l'arquitectura el coneixia.

Per tal d'arribar a les conclusions, havia de fer primerament un recull d'informació sobre el tema, punt on va sorgir el principal obstacle. La informació que tractava estrictament de l'arc catenari, necessària per poder entendre les seves característiques, era limitada. Si buscava a la xarxa, totes les pàgines web em parlaven del mateix, i del tema que jo necessitava no se'n feia cap esment. Fins i tot, a l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), no vaig aconseguir cap llibre que tractés de l'arc catenari. El fet de no poder disposar d'aquesta informació tan específica, va fer necessària la visita a l'edifici més famós fet per el mateix arquitecte, del qual l'estabilitat de tot ell és possible gràcies a aquest arc; La Sagrada Família. Allà, vaig tenir el plaer d'entrevistar a una de les treballadores de l'Oficina del Temple Expiatori, que va proporcionar-me tota aquella informació que no vaig ser capaç de trobar.

En aquesta situació de bloqueig, i a mesura que el treball anava avançant, una primitiva i incompleta idea sobre el motiu del seu desús s'anava construint. I per tal de poder arribar a unes conclusions, parteixo d'un **marc teòric** en el qual s'analitzaran històricament els diferents arcs utilitzats fins arribar a l'arc catenari, profunditzant en la catenària matemàtica i les forces físiques que actuen sobre ell, esmentant algunes construccions actuals que han estat realitzades amb aquest arc. Per últim, posaré en pràctica aquests coneixements adquirits en el **marc pràctic**. En aquesta part, realitzaré un arc de mig punt amb els seus contraforts i un arc catenari per observar des de la meva pròpia experiència les propietats mecàniques de cada un.

Així doncs, fem un viatge al passat fins al segle XI per contemplar l'evolució de les formes arquejades; des de l'art Romànic fins a l'actualitat, passant per l'art Gòtic, el moviment del Renaixement i el Modernisme Català, on ens endinsarem i ens posarem en la pell de l'arquitecte.

MARC TEÒRIC



1. L'ARC

Un arc és una estructura la qual tanca una obertura entre dos extrems denominada va amb diferents peces o dovelles les quals es comprimeixen entre elles evitant la producció d'esforços de tracció i flexió. Aquest és característic atès que les pressions que es produeixen per el pes de la carrega i el pes dels propis materials, són trameses als contraforts situats als costats i extrems de l'arc.

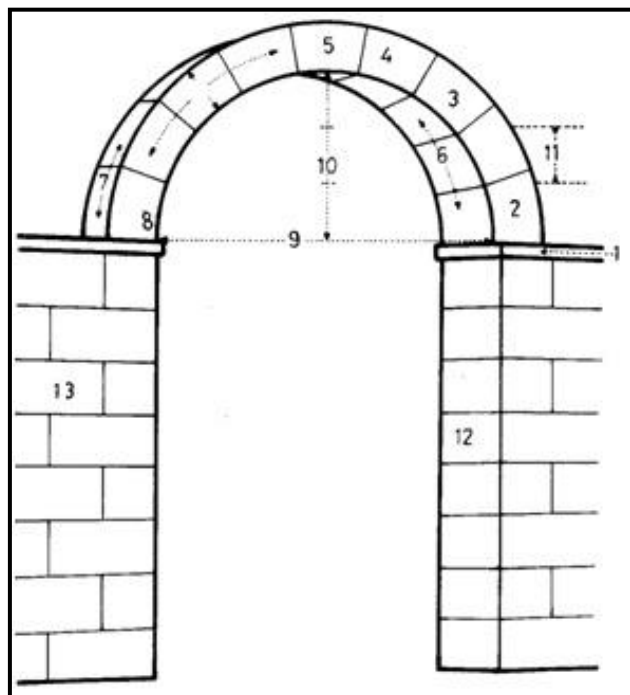
L'arc va aparèixer a Mesopotàmia, el qual va ser utilitzat posteriorment per diferents civilitzacions com per exemple els egipcis o els romans. Aquest, era utilitzat en estructures subterrànies, i els romans van ser els primers que el van utilitzar en estructures de la superfície. Els primers romans, van realitzar uns arcs rudimentaris però eficients gràcies als coneixements que van extreure dels Etruscs, una civilització anterior a ells localitzada a Itàlia, a La Toscana, i all llarg del temps, els romans han anat perfeccionant la seva tècnica.

1.1. COMPONENTS D'UN ARC

L'arc està format per diferents elements, tant com elements constructius, és a dir les peces que formen l'arc en general i elements geomètrics, que són els que defineixen com s'han de disposar cada una de les peces que el construeixen.

La dovella (3), és l'element principal que forma la curvatura de l'arc. En aquesta, hi trobem diferents tipus que fan possible la seva estabilitat per salvar la llum (9).

L'arrencada (8) és la part o el punt on neix l'arc, on es troba el salmer (2), la primera dovella que forma l'arc. Més amunt, trobem el ronyó (11), que és una altre dovella contigua al salmer, la qual està situada entre el primer i el segon terç de la fletxa (10). Aquesta, és la distància que es troba entre el punt





més alt de la corba i la línia horitzontal que formen les dos arrencades. Després d'aquesta, trobem les dovelles que es mantenen per mútua compressió formant l'arc fins arribar a la contraclau (4), la dovella contigua a la clau (5), que és la dovella que tanca l'arc i rep les forces de compressió que es produeixen. L'intradós (6) és la part interna que formen el conjunt de dovelles. I l'extradós (7), la part externa, que juntament, estructuraran l'arc.

La imposta (1) és la peça encarregada de separar l'arc de l'element de sustentació. En aquest, hi trobem el brancal (12), que són els elements verticals que mantenen en sosteniment l'estructura. I al costat d'aquest, trobem l'estrep o el contrafort (13), suport encarregat de resistir i contrarestar les forces produïdes per l'arc.

1.2. CONSTRUCCIÓ DE L'ARC

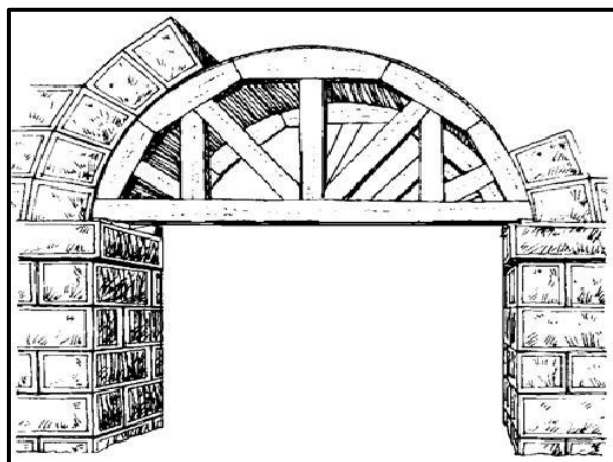
El procés de construcció d'un arc ha anat evolucionant al llarg del temps gràcies al descobriment de nous materials i de noves tècniques i tecnologies.

Per tal de que l'arc quedi totalment construït de manera que no hi hagi cap moviment i sigui totalment estable, uns altres passos i elements s'han de seguir i utilitzar, els quals són anteriors a la col·locació de les totxanes o de les dovelles. Per això, dividirem la construcció d'un arc de mig punt segons la forma de la pedra que utilitzem a l'hora de construir l'arc, ja sigui una dovella en forma de cunya o una totxana.

1.2.1. CONSTRUCCIÓ DE L'ARC AMB DOVELLES

El primer pas que hem de realitzar a l'hora de la construcció d'un arc de mig punt, és situar en la base el què seran els brancals que subjectaran verticalment l'arc separats respectivament l'un de l'altre. I als seus cantons els contraforts per assegurar l'estabilitat d'aquest. (1)

Una vegada aquests estan construïts, ens centrem en la realització del **CINDRI**.





El cindri és una armadura provisional que obté la forma de l'arc, la qual serà utilitzada per poder subjectar els diferents elements que formen durant la seva construcció.

Una vegada fet i col·locat el cindri, és el moment de posicionar les dovelles. Aquestes s'han de col·locar començant des de el salmer (la primera dovelles de totes) i anar col·locant cada una d'elles fins arribar a la contraclau. Al haver acabat de les posar les que ens falten, realitzem el mateix procediment però començant per l'altre costat. Quan ja hem arribat al final, tan sols ens falta posar la clau per tal de que l'arc quedi subjecte. (2)

Com a últim pas, tan sols faltaria treure amb molta cura el cindri. (3) En aquest cas, en teoria, no serà necessària la utilització de ciment entre les dovelles, ja que aquestes estan fetes a mesura, per tant, no hauria de quedar cap separació entre ells i encaixar perfectament.

En aquestes imatges, podem veure representat el procés de construcció d'un arc explica't anteriorment:



Construcció de brancals i contraforts.



Col·locació de dovelles



Extracció del cindri

1.2.2. CONSTRUCCIÓ D'UN ARC AMB TOTXANES

El primer pas en aquest cas és el mateix, s'han de construir els brancals i els contraforts corresponents per l'equilibri de l'arc. En el moment en que es realitza el cindri, es quan apareixen algunes complicacions.

La seva construcció també és la mateixa, però els problemes apareixeran, primer, en què les totxanes no tenen forma de cunya, per tant haurem d'utilitzar ciment o algun altre tipus de material per poder fer nosaltres mateixos la inclinació d'aquestes, o si més no, el que podem fer és col·locar moltes totxanes petites, per tal de que aquestes vagin fent la forma corbada de l'arc sense la necessitat de morter o ciment per fer la inclinació. L'altre problema es presentarà a l'hora de dividir en cindri per tal d'arribar al nombre exacte de totxanes que haurem d'utilitzar. Per això, s'han de fer una sèrie de càlculs:

Primer, calcularem la longitud que cindri i de les totxanes. Al tenir presa la mesura de la totxana, li sumem la junta, que és la quantitat de morter o ciment en centímetres que haurem de posar sobre la totxana per tal de ajuntar-la amb les altres. Una vegada fet això, dividim la longitud total de



l'extradós, la longitud superior de l'arc entre la suma de la totxana i la junta. En el cas de que aquesta divisió ens resulti un nombre parell, significarà que en el lloc on s'ha de col·locar la



clau, s'haurà de posar ciment per ajuntar totes les totxanes, ja que no sobrarà cap per posar-la al centre. En el cas de que sigui imparell el resultat, si que posarem la clau que finalitzarà l'arc. A més, enganxarem junt al centre del peu del cindri una barra que tindrà la mateixa amplada que tenen les totxanes per així saber la inclinació que haurà de tenir cada una d'aquestes al posicionar-la.

Una vegada calculat el nombre de totxanes necessari i el cindri, col·locarem aquest sobre els brancals. Molt important la col·locació de cunyes o falques sota cada extrem del cindri per tal de poder extreure amb més facilitat el cindri al haver acabat l'arc.



El posicionament de les totxanes es realitzarà començant posant morter a una part de l'arc perquè quedi la totxana fixa. Quan ja esta fixada, posem més morter a sobre i amb l'ajut de la barra que hem muntat prèviament, comprovem la inclinació que haurà de tenir la següent totxana. Aquest procés el realitzem de manera ascendent fins arribar a l'última totxana, que serà la clau o la junta. Al arribar a aquest punt, parem i comencem de nou el mateix procediment però en l'altre cantó.

Al haver arribat al punt més alta, per últim posem la clau o la totxana amb la junta que acabarà l'arc. Movem el cindri del seu lloc amb molta cura per evitar qualsevol despreniment i ja hem acabat de construir l'arc.





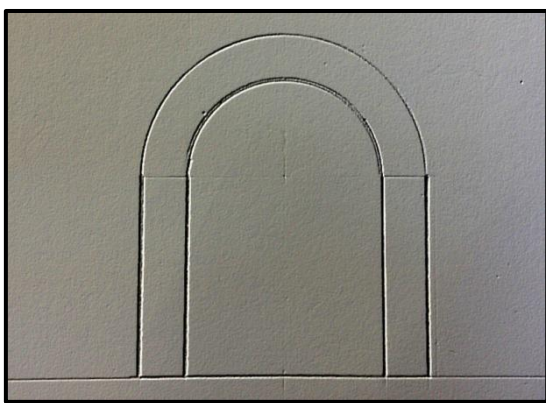
1.3. TIPUS D'ARCS

Al llarg de la història, els arcs han passat de tenir formes simples, com els arcs de mig punt, els quals tenen una forma geomètrica molt simple fins arribar a arcs que es coneixen per la seva cultura i la seva forma és de lo més complicada i particular.

Podríem dividir aquests tipus segons el seu ordre cronològic en la seva construcció per les diferents etapes que alguns d'ells han marcat en la història, segons la seva complexitat geomètrica o segons el nombre de centres que té cadascun d'aquests, i d'aquí sortirien un nombre molt elevat d'arcs, però s'esmentaran els arcs més utilitzats.

1.3.1. ARC DE MIG PUNT

L'arc de mig punt ha estat i és el més utilitzat durant tota la història, des dels antics mesopotàmics en el 3000 a.C fins les obres més actuals.¹



1.3.2. ARC REBAIXAT

Aquest arc es construeix quan no hi ha espai suficient per construir un arc de mig punt complet. I per tal de construir-lo, rebaixem el centre de l'arc sota el nivell de la imposta, aconseguint formar tan sols un segment de la circumferència.

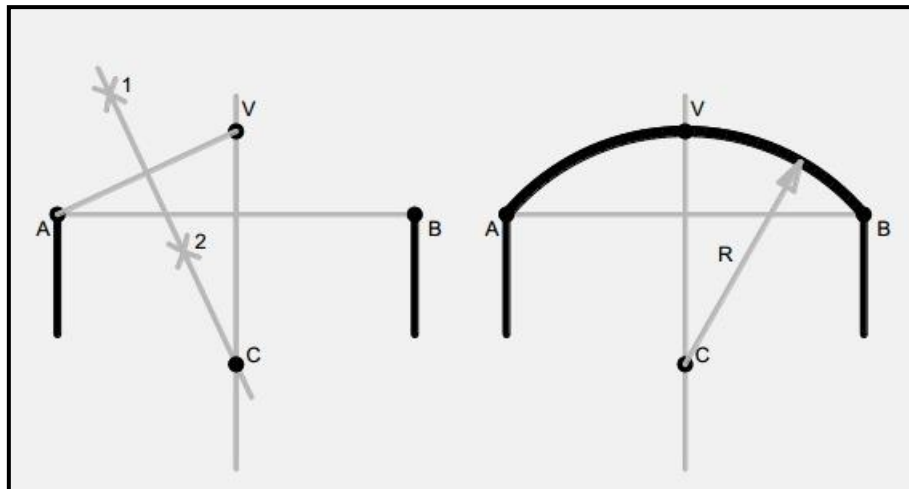


Per tal d'arribar a construir aquest arc, determinem en la línia de la fletxa² el vèrtex (V) el qual serà el punt més alt de l'arc. Unim aquest punt amb el punt A, i tracem una perpendicular que,

¹ Vid. Pàgines 1-5 Arc



prolongada, es creuarà amb la mediatriu³. que passa per el centre i determinarà el centre de l'arc.



1.3.3. ARC ESCARSER

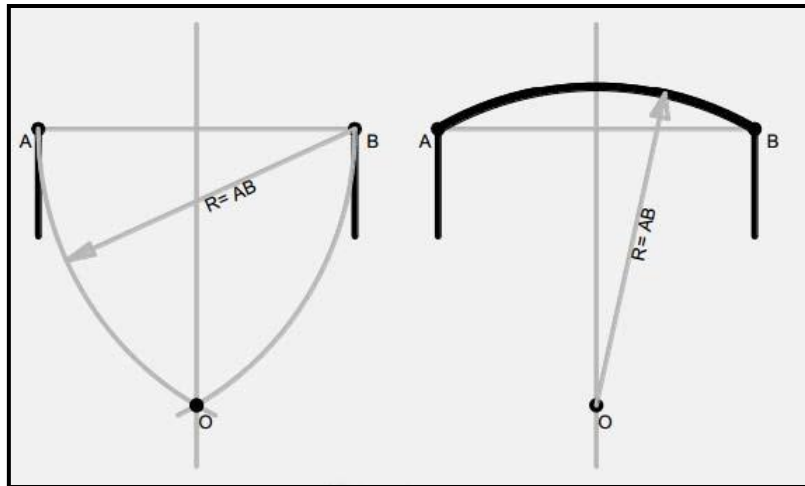
L'arc escarser pot ser fàcilment confós amb l'arc rebaixat, atès que el centre dels dos arcs es troba sota la imposta, però la manera de trobar el centre d'aquest arc és diferent al de l'arc rebaixat.



Per trobar el centre, amb el compàs, tracem dos arcs; un que des de A s'obre fins a B, i un altre que de B s'obre fins a A. El punt on es creuin aquests dos arcs sobre la mediatriu, serà el centre de l'arc.

² Vid. Fletxa Pàgina 1

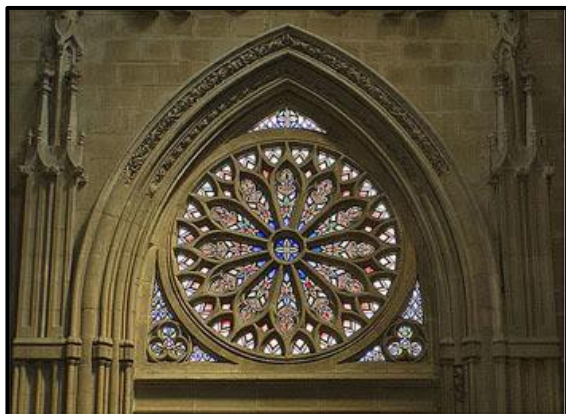
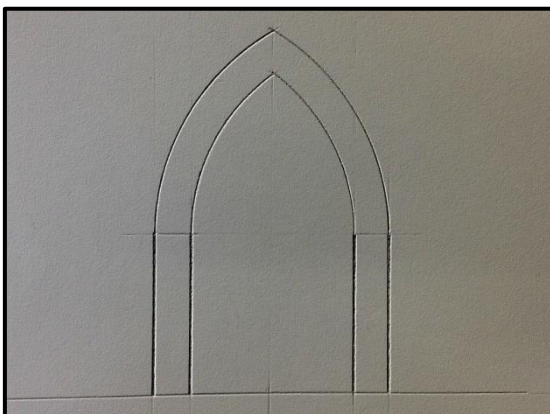
³ Recta perpendicular que passa per el punt mig.



1.3.4. ARC OGIVAL O GÒTIC⁴

L'arc ogival o gòtic és l'arc que tal i com diu el seu nom, va marcar l'arquitectura gòtica entre els segles XII i XV, durant l'època del Renaixement substituint l'arc de mig punt. Va predominar sobretot en la construcció de catedrals.

A diferència dels arcs explicats anteriorment, el seu centre es situa en els punts A i B, és a dir, en cada un dels extrems de la imposta. Geomètricament, la seva projecció és més difícil però la distribució de les forces és millor.



⁴Actualment, és més conegut com ARC APUNTAT



1.3.5. ARC DE FERRADURA

Aquest arc està compost per dos petits arcs de circumferència als costats i un gran arc central a la part superior, el qual és més gran que la corba de l'arc de mig punt. És característic de l'art visigot i de l'art hispano musulmà. El podem veure que predomina en construccions musulmanes, com per exemple en l'Alhambra de Granada o la Mesquita de Còrdova.

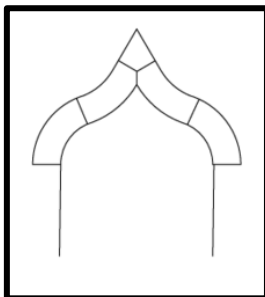


L'Alhambra, Granda



Mesquita de Còrdova

1.3.6. ARC CONOPIAL

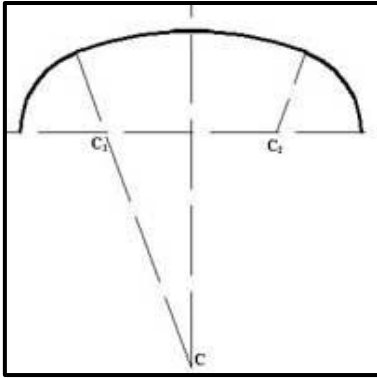


L'arc conopial és un tipus d'arc apuntat (ogival) també predominant de l'arquitectura gòtica del Renaixement.

És format per quatre centres dos dels quals es troben en la línia de la imposta i els altres dos són invertits a la part superior, formant un vèrtex.

1.3.7. ARC CARPANELL

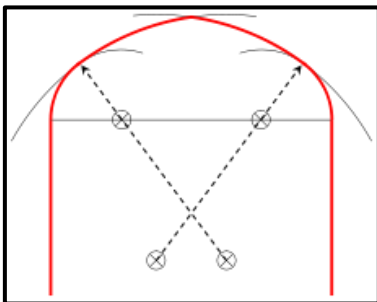
Tipus d'arc semblant a l'arc rebaixat simètric el qual es forma a partir de tres centres, dos dels quals són uns petits arcs situats als extrems, donant una forma arrodonida a l'arc, i el tercer es troba més rebaixat.



1.3.8. ARC TUDOR

És un altre tipus d'arc rebaixat que està format per quatre centres: dos d'aquests són arcs de radi petit que arrodoneixen l'arc per els extrems, i els altres dos es situen en la part inferior i s'uneixen en la mediatriu.

Va ser emprat sobretot en l'arquitectura anglesa en el segle XV, sobretot en finestres.



1.3.9. ARC RAMPANT

Aquest arc té els salmers⁵ a diferents altures, i l'arc és format per dos arcs de 90° de diferents radis.

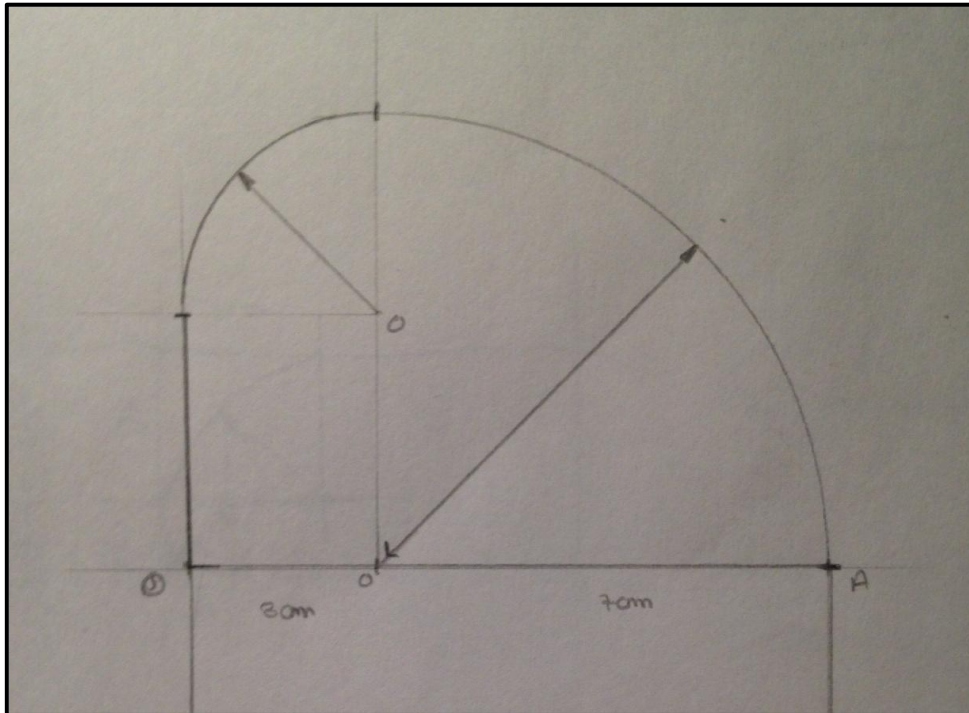
Per poder construir un arc com aquest, hem de dividir un segment OA en dos parts desiguals, per exemple, si el segment fa 10 cm, el dividim en dos segments de 3 i 7 cm.



⁵ Vid. Salmer Pàgina 1



En la part més gran, fem un arc que tingui un angle de 90° , i en la part més alta, serà la part més alta de l'altre arc. Traslladem el segment petit fins a l'altura corresponent, i realitzem l'arc de radi inferior, i així tindrem l'arc rampant.



1.4. FORCES

L'arc és una de les estructures més antigues però més eficients de l'arquitectura, característica per fet de treballar a forces de compressió i no a partir de forces de tracció ni flexió.



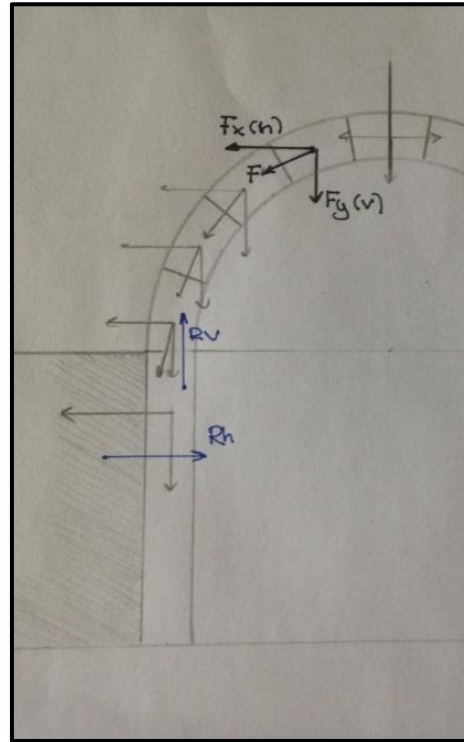
En l'antiguitat, si es volgués salvar un espai entre dos murs o quelcom, depenent de la seva distància i de la carrega a la que fos sotmesa la biga es partiria. Per exemple, els grecs utilitzaven la biga per fer les seves construccions, però

aquest mètode era limitat. Quan més distància hi hagués, l'esforç augmenta i la biga és incapaç de mantenir-se en equilibri i es trenca.



Però més endavant es va descobrir l'arc, i que aquest podia salvar distàncies majors gràcies als esforços per els quals treballava, els de compressió. Aquests esforços es donen quan un cos intenta aixafar un altre.

El pes del material sempre cau en vertical produït per el sosteniment d'un pes major o tan sols per la gravetat, però la forma de cunya de les dovelles te la característica de que les forces de pressió verticals, es transmetin per elles formant una línia de pressió i convertint aquestes forces verticals en laterals. Per això, la força que produirà la clau, al no poder caure cap al terra i clavar-se a les contraclaus, els pes es desplaçarà de forma diagonal donant com a resultant les components d'aquesta força diagonal, les components vertical ($F_y(v)$) i horitzontal ($F_x(h)$).



Cada dovella transmet aquesta força fins al final, però aquesta força haurà de ser canalitzada per una altra que tingui la mateixa direcció però un sentit oposat a aquesta. És aquí on juguen un paper molt important el brancal i el contrafort.

El brancal realitzarà una reacció vertical (R_v) que canalitzarà les components verticals, degut a que aquest és l'encarregat de mantenir l'arc elevat. Per això la reacció serà cap a dalt, fet que produirà que la suma d'aquestes dos forces oposades serà igual a zero, és a dir, que serà estable.

I el contrafort també serà essencial, ja que és l'encarregat de canalitzar les forces que horitzontals i evitar l'enfonsament. Si no hi hagués contrafort, l'arc s'aniria a terra.

$$\Sigma F = 0$$

$$X: F_x(h) + R_h = 0$$

$$Y: F_y(v) + R_v = 0$$



2. L'ARC CATENARI

L'arc Catenari és aquell arc que sorgeix de d'inversió d'una cadena i que, a diferència de la majoria d'arcs construïts al llarg de la història, no necessita contraforts en els laterals per tal de mantenir-se en equilibri.

En un arc de mig punt o apuntat, veurem que les forces van als laterals i les haurem de contrarestar amb un mur⁶. En canvi, les forces que es donaran en l'arc catenari aniran directament cap a terra, és a dir, les forces seran majoritàriament verticals evitant la necessitat d'utilitzar contraforts.

Aquesta característica tan distintiva i pròpia de l'arc catenari es deu gràcies al fet que l'arc defineix la forma de la Catenària.

2.3. CORBA CATENARIA



La catenària⁷ és aquella corba que descriu la forma d'una cadena que penja de dos extrems la qual tan sols està sotmesa a la força de la gravetat i distribueix el seu pes uniformement.

El fet de què aquesta corba es descriu tan sols per el mateix element del seu pes, provoca que les tensions horitzontals del cable o la cadena es compensin de manera uniforme. Per tant, aquesta no patirà de tensions laterals, romandrà estable sense moure's cap als costats i les forces que actuaran en l'arc seran verticals, produïdes per l'atracció de la gravetat i unes tensions tangents en cada un dels punts de la cadena que faran que es mantingui estirada.

Aleshores, al construir l'arc amb la forma de la catenària, les tensions que haurà de suportar en cada punt d'aquest es dividiran en dos tipus de components:

- Components verticals: tensions que mantindran l'arc en equilibri.
- Components de pressió: tensions que es transmeten a través dels fonaments de l'arc fins a arribar a terra sense crear esforços horitzontals.

⁶ Vid. Punt Forces Pàgina 10-11

⁷ Del llatí *catenarius*, pròpia de la cadena



2.3.1. EQUACIÓ MATEMÀTICA

La fórmula matemàtica de la catenari és la següent:

$$y = a \cosh \frac{x}{a}$$

També coneixem que la fórmula del cosinus hiperbòlic és aquesta:

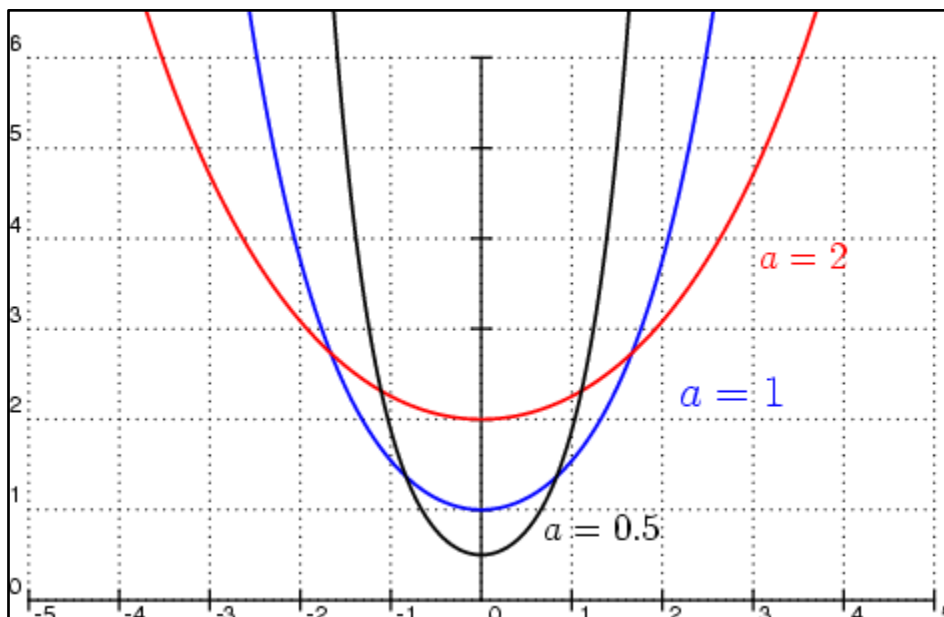
$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

Per tant, si substituïm a la fórmula inicial de la catenària el cosinus hiperbòlic, obtenint la fórmula final de la corba catenària:

$$y = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right)$$

$$y = a \cosh \frac{x}{a} = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right)$$

Substituint la a en l'equació per diferents valors, la qual regularà l'obertura de la corba i també donem valor a la X i obtindrem representada la forma de la corba catenària:





2.3.2. DIFERÈNCIA ENTRE LA CATENÀRIA I LA PARÀBOLA

El problema que va comportar la catenària va ser que els primers matemàtics que van tractar amb aquesta singular corba, pensaven que es tractava d'una paràbola.

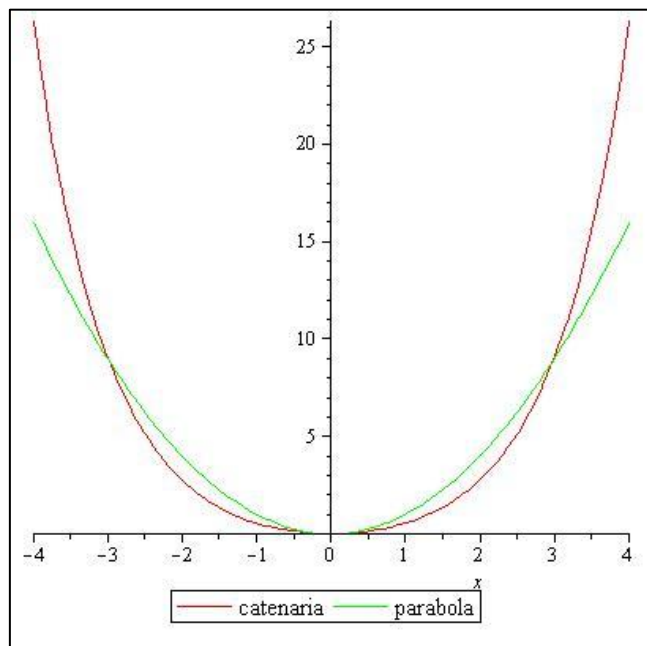
La similitud que hi ha entre la catenària i la paràbola va arribar a confondre fins i tot al astrònom, matemàtic, filòsof i físic Galileo Galilei. Però uns anys més tard, Christiaan Huygens, en els seus 17 anys el 1646 va demostrar que aquestes dos corbes no eres el mateix, tot i que no va poder concretar amb la fórmula de la catenària. I més endavant, en el 1691 el propi Huygens, Johann Bernoulli i Leibniz van determinar l'equació d'aquesta, la qual descriu la forma del Cosinus Hiperbòlic.

Aquestes són unes de les diferències que es troben entre la paràbola i la catenària:

- Les equacions que descriuen cada una de les corbes són d'un tipus molt diferent. L'equació de la paràbola és del tipus quadràtic, i s'expressa de la següent manera;

Mentre que l'equació de la catenària es representa a partir d'una equació hiperbòlica, que descriu concretament un Cosinus Hiperbòlic. Aquesta és l'equació; $y = a \cosh x$ —

- Gràficament, la diferència fonamental es troba en la tangent de la corba. La paràbola tendeix a una constant, un valor fixa, mentre que la catenària tendeix a la verticalitat. Per això, a mesura que el valor de X creix, les corbes s'apropen i aquests valors són limitats pels valors infinits a la Y. En canvi, a la paràbola els valors tant en la X com en la Y són infinits.





2.4. CONSTRUCCIÓ DE L'ARC CATENARI

Al voler construir una estructura, sempre trobem la necessitat de plasmar la nostra idea en un paper per fer una idea a l'arquitecte o a la constructora de com volem que sigui allò que desitgem construir.

En el cas dels arcs, ja hem vist en el punt anterior com construir un arc de mig punt. Pel que fa als plànols, a l'hora de voler dibuixar un arc, també s'ha vist en el punt anterior que molts d'aquests, tan sols amb l'escaire, el cartabó i el compàs es pot determinar l'arc que s'haurà de construir. Aquí és on sorgeix un dels problemes de la catenària.

La catenària no es pot dibuixar amb cap d'aquestes tres eines. És com intentar dibuixar una el·lipse amb compàs i regla. Ara bé, amb les eines esmentades es pot trobar els punts que unint-los entre ells formaran l'el·lipse. Però amb la catenària tampoc es podrà fer.

Per tal de poder dibuixar la catenària, s'hauria de recórrer a la fórmula matemàtica d'aquesta per trobar-ne els punts i unir-los. O si més no, es pot fer de la forma en que és feia antigament; En un suplement vitalici⁸ o un suplement subjectat de forma vertical, es penja la cadena i per l'única acció de la gravetat la cadena agafarà la forma del futur arc. Es poden dibuixar els diferents punts darrere i unir-los o fotografiar la cadena, invertir la fotografia o el dibuix i obtenir l'arc.

La maqueta d'aquest arc no té gaire complicació, atès que al ser de mides reduïdes doncs es pot fer d'una sola peça o dividir-ho en diferents peces. La situació es complica a l'hora de fer la construcció real. Degut a l'escassa, per no dir nul·la, informació sobre com es construeix un arc catenari, es generalitzarà el procés amb l'ajuda d'unes fotografies del Gateway Arch de St. Louis, Estats Units (se'n parlarà en l'últim punt).

Depenent de l'altura que presenti l'estructura, amb una bastida ja és possible fer l'arc amb ajuda també d'alguns suplement per evitar fer errors en la inclinació i que caigui. Si la seva altura és molt major, com la del Gateway Arch, serà necessari l'ús de grans grues per col·locar les diferents parts i evitar que caigui l'estructura construïda.



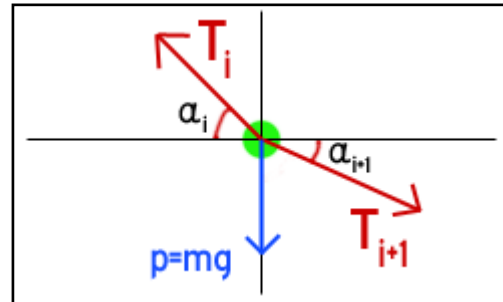
⁸ Element semblant a un sostre d'on es penja la cadena perquè caigui i agafi la forma de la catenària.



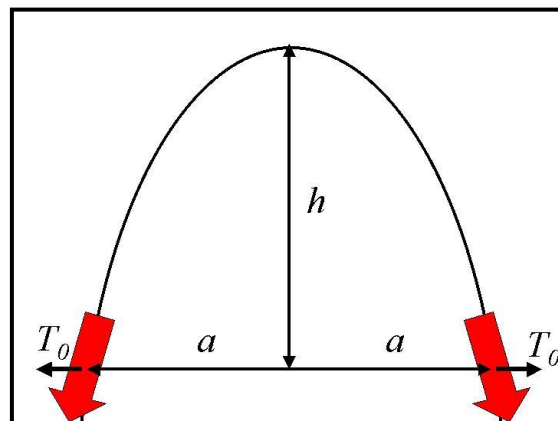
2.5. FORCES

Totes les propietats matemàtiques que obté la forma de la catenària, que està formada per una cadena suspesa, en la que actua tan sols la força de la gravetat o alguna massa puntual sobre aquesta, mantindrà la cadena estable, formant l'arc catenari a partir de la seva inversió.

En aquesta cadena, com ja s'ha esmentat anteriorment, les forces que actuen sobre aquesta són forces verticals; la força de la gravetat ($p=mg$) i unes tensions tangents (T_i) en cada punt de la cadena que la mantindran estirada.



És gràcies a aquestes propietats que en invertir la cadena i obtenir l'arc catenari, aquest adquireix totes les avantatges mecàniques que presenta. Els esforços de compressió o cisalla que es produeixen entre cada part de l'arc es minimitzen. Cada punt de l'estructura patirà d'una sèrie de forces i tensions que faran que aquest es mantingui estable. Degut a què la força que actua en la formació de la catenària és la gravetat, el futur arc patirà en cada un dels punts bàsicament de tensions tangencials que s'anul·laran entre elles mateixes, dividint-se en una component de vertical i una component de pressió. Aquestes, es transmetran per cada un dels punts del mateix arc fins a arribar als fonaments de l'arc, on es produiran esforços laterals. Aquestes tensions horitzontals a peu de terra, es poden minimitzar encara més donant una llum major a l'arc catenari. És per aquest motiu que els arc catenaris de l'estructura interna de la Sagrada Família mesuren entre 40 i 60 metres. Aquesta propietat tan singular és la que permet que l'arc catenari no requereixi de contraforts per mantenir-se estable.





Però durant la història de l'arquitectura, enfocada des d'un punt de vista on els arcs són el seu protagonista, l'arc catenària s'oblida pràcticament del tot.

Com ja s'ha vist, en l'antiguitat, com ara a Roma, els arcs tenien formes més simples i més circulars, els quals eren més fàcils de construir però al mateix temps molt menys estables, ja que necessitaven uns grans contraforts per aguantar, com per exemple els arcs de mig punt del Romanticisme.

Més endavant, els arquitectes gòtics utilitzaran els arcs ogivals, els quals estaven dotats d'una forma molt semblant a la catenària i reduïen més les tensions laterals. Però encara requerien de robustos contraforts.

No apareixerà l'arc catenari fins a finals del s. XIX, data en la que sorgeix el Modernisme a Barcelona, del qual l'arquitecte Antoni Gaudí, màxim exponent del moviment català, farà un gran ús d'aquest.



3. ANTONI GAUDÍ I L'ARC CATENARI

3.1. LA RECERCA D'UN ESTIL PROPI

Antoni Gaudí i Cornet, arquitecte català nascut a Reus el 25 de juny de 1852 i mort el 10 de juny de 1926 és reconegut arreu del món com a un dels grans genis de l'arquitectura. Tan ell com molts altres artistes de diferents èpoques i molt anteriors a l'arquitecte, tenien una visió del passat molt més bona de la que tenen del seu present. És per això que imitaven el passat, èpoques que des del seu punt de vista, havien estat glorioses.

Gaudí, des del primer moment en què va començar a estudiar, ja volia desenvolupar un estil personal. La seva meta mai havia estat arribar a la puresa de l'estil. Però ell no imitava, sinó que s'inspirava en l'antiguitat. L'estil que va estudiar a la universitat va ser el neogòtic, seguint les teories dels arquitectes francesos entre els segles XI i XVI, les quals es van tornar un model a seguir per a tots els estudiants, com per exemple Voillet-le-Duc⁹.

A finals de segle, a Espanya hi ha un ressorgiment de l'Edat Mitjana i un sentiment nacionalista polític. I dins d'aquest, apareix un entusiasme cap al exòtic, admirant les obres de l'arquitectura musulmana que procedeixen de la dominació àrab a Espanya. Aquesta fascinació per a les coses exòtic es fa notar en els salons més refinats.

Aquest període àrab destaca per la combinació de diferents materials; la conjunció de pedres de maçoneria¹⁰ sense llaurar amb rajoles de ceràmica. Aquesta influència àrab es pot veure a la Casa Vicens, en la que a més de tenir símbols dels edificis islàmics, Gaudí incorpora elements propis. Per això, és més correcte parlar d'un estil mudèjar, un estil en el qual es barregen elements arquitectònics àrabs i espanyol.

En el ressorgiment anterior de l'Edat Mitjana a Espanya, també va haver-hi un descobriment de l'estil gòtic, encara que, en les obres més posteriors dins d'aquest estil, l'arquitecte ja incorporava en aquestes peculiars empremtes gaudinianes. Tot i la seva admiració per aquest estil, creia que aquest era imperfecte en l'àmbit constructiu, atès que les estructures necessitaven boterells¹¹. Elements que Gaudí anomenaria despectivament com a les croses d'un edifici.

⁹ Arquitecte francès teoritzador de les reconstruccions d'edificis medievals i entitat recuperadora del Gòtic a França.

¹⁰ Obra feta amb pedres o maons, generalment lligats amb un element de cohesió.

¹¹ Element estructural exterior en forma de mig punt que recull les pressions de l'edifici.



És en aquest moment on ja comença a aparèixer noves inspiracions cap a nou estil, utilitzant en l'Escola de les Teresianes arcs parabòlics en els passadissos.

Gaudí desenvolupa desenfrenadament el seu propi estil arquitectònic, allunyant-se de les imitacions i dedicant-se exclusivament a la Ciutat Condal. Era considerat un arquitecte social, ja que ell no construïa per arribar a ser reconegut i guanyar fama (escapava dels periodistes i les càmeres), sinó per a la ciutat. Tenia un compromís social.



La primera de les seves obres que se separa de l'arquitectura del moment és l'edificació d'un parc d'inspiració anglesa, el Parc Güell. Però a l'hora de dedicar-se la reconstrucció de blocs d'edificis, trencarà definitivament amb les creacions dutes a terme fins al moment. Una d'aquestes serà l'edifici situat en el Passeig de Gràcia núm. 43 de Barcelona, la Casa Batlló. Una casa que va provocar gran controvèrsia entre la societat barcelonina d'aquella època. Però aquesta va anar en augment amb la construcció d'una casa en el mateix carrer,

la Casa Milà o coneguda popularment com La Pedrera. Paral·lelament, Gaudí seguia ocupat amb un càrrec que el mantindria ocupat tota la seva vida, la seva obra mestra; La Sagrada Família.

Aquest estil tan propi, se li va anomenar Modernisme, també conegut a la resta d'Europa com Art Nouveau, Sezession, Liberty... Però, el modernisme del qual Gaudí n'era el màxim exponent, era conegut com a Modernisme Català, el qual destacava i es diferenciava de tots els altres estils modernistes arreu d'Europa.



Gaudí creia que una obra havia de ser construïda a partir de l'observació de la natura, que és l'origen de tot. D'aquest manera la construcció seria molt més perfecte. – *El gran libro siempre abierto y que hay que hacer el esfuerzo de leer es el de la naturaleza, los otros libros han sido extraídos de este y además contienen equivocaciones de los hombres.* – Unes altres característiques importants són l'ús del ferro desfet per donar forma als seus balcons, el maó i la no utilització de línies rectes, com per exemple en els balcons i l'interior de la Casa Batlló o la mateixa façana de la Pedrera.



3.2. L'ARC CATENARI

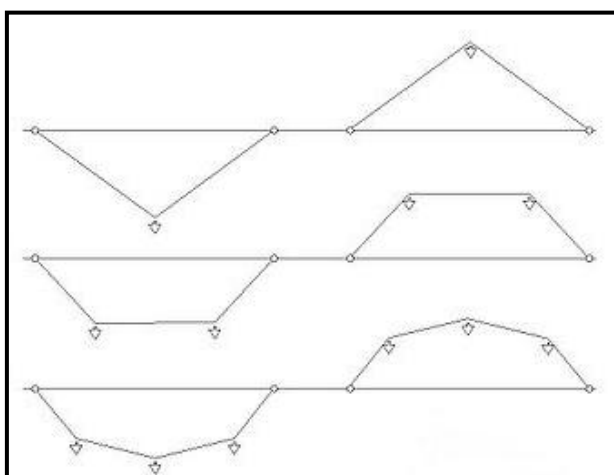
Com ja hem vist, l'arquitectura gòtica no era perfecte. Els esforços laterals que produïen les construccions que es realitzaven seguint aquest estil, com per exemple les catedrals, que requerien també uns grans boterells als costats per evitar l'obertura dels arcs ogivals que la formaven. Però això també passava amb l'arquitectura romana, que utilitzava arcs de mig punt que necessitaven contraforts encara més pesants per poder anul·lar les tensions.

Per Gaudí, aquests contraforts i boterells dels quals prescindien les construccions arquejades eren com les croses d'un edifici. Una estructura estable, a més del disseny posterior, era importantíssim per a l'arquitecte. Per aquest motiu busca solucions alternatives per millorar aquesta estabilitat i realitzar estructures que poguessin prescindir d'aquestes ortopèdies, donant pas a l'ús de l'arc catenari en la majoria de les seves obres, poc habituals en aquella època.

Aquest element que prové totalment de la naturalesa, evita que l'estructura s'hagi d'aguantar per estranys elements ortopèdics. Però, a més d'aquesta gran avantatge estructural, aquest arc presenta una estètica molt grata per a l'arquitecte, fent un ús molt constant d'aquest en llocs fins i tot on altres estructures haguessin estat possibles. Tal com Gaudí argumentava, l'arc catenari donava elegància i espiritualitat a l'arc, a més de pesar menys dona a l'obra vaporositat.

Utilitzant una cadena que penja d'un suplement vitalici, aconseguia donar forma a l'estructura, però l'arquitecte no es va quedar aquí, va anar més enllà. En aquesta cadena, Gaudí muntava uns saquets plens de sorra o petits balins de perdigó, els quals eren penjats en diferents punts de la cadena penjant. Una vegada col·locats, aquests deformaven la cadena, donant-li una nova forma a l'arc catenari, tal com es veu a la fotografia. Per què feia això Gaudí?

Aquestes càrregues puntuals sobre l'arc, representaven cada una de les resistències que hauria de suportar en certs punts l'arc catenari a escala. És per això que els saquets, deformaven la cadena donant-li a l'arc la forma idònia que havia de tenir per prescindir de





suports estructurals.

Però aquest sistema presentava un cert inconvenient. Gràcies als seus amplis coneixements geomètrics, arquitectònics i estructurals, no seria obstacle per què l'arquitecte realitzes grans obres sense aquests suports que es podien obviar. Va observar que, aquests arcs que no tenien gaire alçada, ja sigui formats a partir de la cadena sola o amb pesos incorporats, patien d'unes tensions horitzontals importants.

Donat aquest fenomen, va optar per donar-li una alçada molt major, aconseguint així minimitzar pràcticament del tot les tensions laterals de l'arc. Així, l'arquitecte va aconseguir realitzar una estructura que posseïa unes virtuts estètiques, mecàniques i funcionals excel·lents, a més d'altres formes complicades que també va aplicar com d'hiperboloide, el paraboloides i el conoide.

Tots aquests amplis coneixements, els va portar encara molt més enllà. Gaudí no era una persona de dibuixar molts plànols abans de posar fil a l'agulla, sinó que preferia projectar les seves idees dissenyant maquetes en tres dimensions.

Gràcies a aquests extensos coneixements de geometria estructural, la inversió de la catenària, etc, es va adonar que enganxava diferents cadenes entre elles i sota d'aquest suplement vitalici amb les cadenes, aconseguiria veure la forma que tindria la futura construcció. I aquest mètode és el que va seguir per construir la maqueta funicular de la Colònia Güell.

Gaudí ja estava introduït dins el món de les esglésies, havent restaurat anteriorment l'interior de la Catedral de Palma de Mallorca. El seu pròxim objectiu era dissenyar una església pròpia, creant així una maqueta funicular que seria més gran que una persona, a partir de cadenes unides entre elles, les quals representaven els murs i les voltes de l'edifici i un dibuix de l'aspecte que tindria sense donar cap mena de detall.





En cada una d'elles, en els seus extrems hi col·locava uns pesos que representaven les càrregues que hauria de suportar l'estructura, podent calcular directament el pes de l'edifici.

Primerament ho va posar en pràctica amb el disseny de la Colònia Güell, construcció la qual mai es va dur a terme, tan sols la seva cripta, la Cripta de la Colònia Güell. Però aquest intent o va ser inútil per a l'arquitecte. Va ser una aproximació a la ideació de l'estructura que tindria la seva obra mestra, la Sagrada Família.





3.3. OBRES DE GAUDÍ

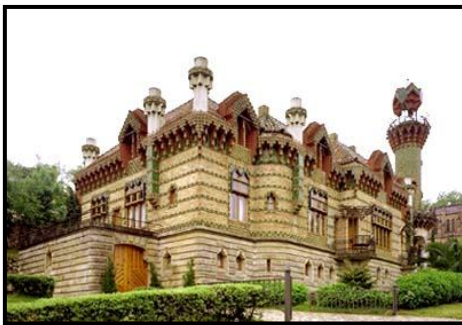
Tot i que l'arquitecte es va dedicar plenament a la Ciutat Condal, també va haver-hi una projecció fora de Catalunya de la seva obra. És més, 7 de les obres fetes per Gaudí (totes situades a Barcelona) han estat considerades per la UNESCO Patrimoni de la Humanitat per la gran contribució al desenvolupament creatiu i tecnològic de l'arquitectura en aquella època.

En quasi tots els edificis de l'arquitecte, l'arc catenari hi té una presència permanent, però la seva funcionalitat és diferent.

Al començament del seu període com a arquitecte, l'arc apareixerà tan sols com a un possible revestiment de les portes o les finestres. A mesura que passa el temps i Gaudí desenvolupa en estat pur el seu estil, aquest arc passarà a ser l'element estructural principal de l'edifici.

Les obres més destacades fora de Catalunya són:

3.3.1. EL CAPRICHIO



Aquesta casa està situada a Comillas, Santander, construïda per a un soler adinerat entre el 1883 i el 1885. En aquesta no hi ha arcs catenaris, però destaca l'art àrab, utilitzant rajoles amb gira-sols amb els que Gaudí s'inspirava en aquells moments.

3.3.2. PALACIO EPISCOPAL DE ASTORGA

Aquest gran palau va ser encarregat per un Bisbe a León al 1887, i es veu clarament la inspiració de Gaudí en Viollet-le-Duc i l'època medieval. Degut a les grans torres circulars, recorda més a un castell que a una construcció religiosa, tot i que els crítics qualifiquen aquesta obra d'estil neogòtic.





Aquestes són unes de les obres més destacades de Gaudí fora de Catalunya i que es situen durant el període de recerca del seu estil personal, tot i que se'n poden destacar d'altres també igual de singulars en aquells temps, com per exemple la Casa Vicens.

Cada vegada s'apropa més al desig de fer una cosa totalment seva, de seguir les lleis de la natura i jugar amb ella, provant d'imitar-la per tal que la seva construcció sigui d'allò més perfecte, com la natura, l'origen. Per això, l'arquitecte utilitzarà primer l'arc catenari a escales petites fins a adonar-se de les magnífiques característiques que presenta, donant-li la el càrrec de ser el bressol de l'edifici.

3.3.3. LA FINCA GÜELL

Començada l'any 1884 i finalitzada el 1887, és la tercera obra de l'arquitecte. Datada en un període en el qual encara no havia posat en pràctica el modernisme, aquí ja hi comencen a destacar alguns elements gaudinians. A la façana de la finca, la qual estava custodiada per un gran drac de ferro, hi trobem arcs catenaris que revesteixen la porta principal i les finestres.



3.3.4. EL PALAU GÜELL (1886-1888)

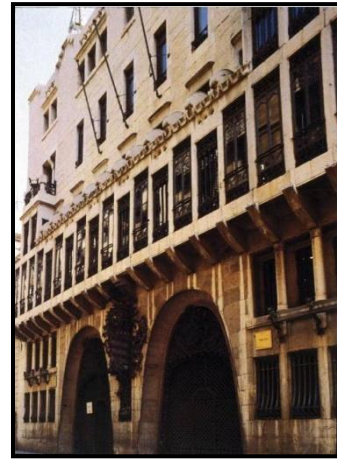
Presenta unes petites torres que recobreixen les xemeneies de la teulada, tret que es convertiria en un dels elements més característics de l'estil gaudinià. L'entrada d'aquest Palau el formen dos grans arcs catenaris que cobreixen dues portes de ferro enreixades, incorporant-se dins una façana discreta en una mala zona, atès al petit solar que era per un palau i pel fet no tenir cap angle bo per poder apreciar l'obra totalment.

Els arcs catenaris de les portes eren novetat i van sorprendre a la societat de Barcelona d'aquella època, però aquests es van tornar habituals per a la gent i fonamentals per l'arquitecte.





A l'interior del palau també hi havia presència d'aquest arc en moltes parts, com per exemple en columnes, voltes fetes amb aquest arc, finestres...



Les següents obres ja tenen aquell estil tan buscat per l'arquitecte, en les que no falta l'arc catenari com a un element estètic i estructural.

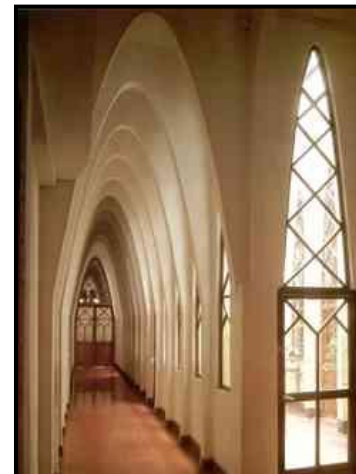
3.3.5. ESCOLA DE LES TERESIANES (1888-1889)



L'escola ja havia estat començada l'any 1887 per l'arquitecte Joan Baptista Pons i Trabal, però el treball li va seguir assignat un any després a Gaudí. Era la primera obra que presentava un pressupost baix. Es van manipular materials simples i barats com rajoles, també un dels seus materials preferits, el ferro forjat a la façana i les reixes. Però el que més destaca de l'escola

són els passadissos del seu interior.

Gaudí va rebre el càrrec d'acabar la primera planta i fer la segona. Tot i que els ciments principals ja estaven posats quan va rebre la proposta, l'arquitecte va deixar empremta del seu enginy en aquestes plantes. La utilització de l'arc catenari marcarà la diferència. Uns llargs passadissos simètrics a base d'arcs parabòlics i catenaris, seran suficients per aguantar l'estructura de tot l'edifici. A més, gràcies a les seves propietats mecàniques no era necessari utilitzar grans elements de suport, donant als corredors més amplitud i lluminositat.





3.3.6. CASA BATLLÓ (1904-1906)

En el Passeig de Gràcia número 43, en el 1877 ja s'havia construït l'edifici, el qual li va ser encarregada la remodelació d'aquest per Josep Batlló i Casanova, un adinerat fabricant tèxtil. Batlló va demanar permís per poder tirar a terra els fonaments situats en llarg però estret solar, però l'arquitecte no tenia la necessitat de començar de zero, amb materials d'allò més simple podia aconseguir grans resultats. A més, creia que aconseguir quelcom totalment nou a través de la remodelació tenia el seu atractiu.



La Casa Batlló, una vegada ja remodelada, havia sembrat el desconcert per tota la ciutat. S'havia convertit amb una autèntica novetat, allunyant-se per complet de la trajectòria de l'època i apropant-se al naturalisme orgànic.

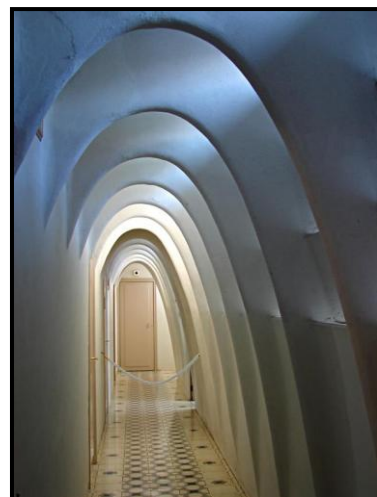
La façana trenca amb tot el que es troba al voltant de "L'illa de la Discòrdia". L'anterior casa presentava una estructura bàsicament rectangular, però l'artista vol donar una nova distribució a l'estructura i suprimeix totes les línies rectes de l'edifici. Aquest tret fa que tot sembli que flueixi. La façana, amb unes peces petites de pedra arenosa de Montjuïc formaven



un mosaic, que representaven el mar en moviment amb balcons fets de ferro forjat, adoptant la forma d'un antifaç. Ascendint per aquesta, l'obra acaba en una teulada molt peculiar, la qual recorda a l'espina dorsal d'un dinosaure. Està format per teules redones de color rosa blavós i l'adorna amb una cresta dentada.

A l'interior seguia aquesta flexibilitat i les línies ondulades. Hi havia una bona distribució per part dels habitatges i zones comunes, dividint 8 pisos de 200 m² en 4 plantes, un pati comú, una façana posterior i un terrat de 300 m².

Aquesta zona comuna es troba a l'última planta, el traster, de 460 m² on es trobaven els safareigs, trasters i altres zones comunes i serveis pels propietaris. Per què destacar aquesta planta? La seva estructura és diferent de la resta de l'edifici. Utilitza els arcs catenaris per estructurar la sala i sostenir el pes del terrat. Aquesta funcionalitat, cada vegada es torna més i més freqüent per a l'arquitecte.



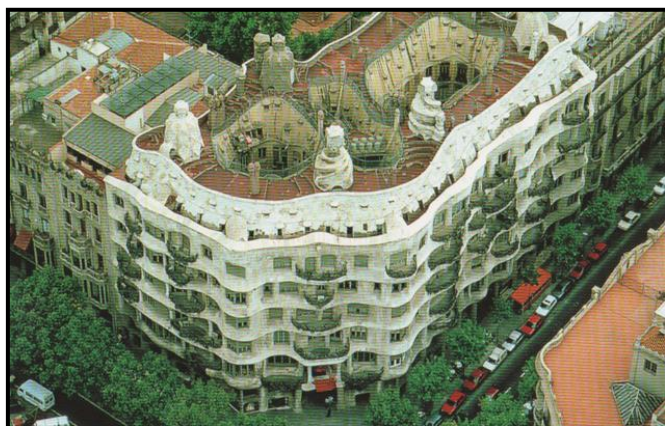
3.3.7. CASA MILÀ (1906-1910)



La població bocabadada es va inspirar en el color i l'aspecte de la seva façana per batejar l'edifici amb el sobrenom de "la Pedrera", última obra civil que realitza l'arquitecte abans de dedicar-se per complet la resta de la seva vida a la Sagrada Família.

El bloc de pisos va ser objecte de moltes crítiques dels observadors, i si la comparem amb anteriors obres com la Casa Batlló, falta la fascinant explosió de colors i l'abundant joc de ceràmica que dona vida a les diferents formes de l'edifici. A més, l'artista va perdre interès en ella degut a una sèrie de conflictes que van sorgir amb Pere Milà, propietari de l'obra i durant el transcurs dels treballs, deixant uns detalls de la façana inacabats.

L'edifici, situat a la cantonada del Passeig de Gràcia i el Carrer de Provença, va ser desviat fent-la retrocedir corbant tot ell literalment, formant una corba serpentina, semblant a la del banc del Par Güell. Aquest tret proporcionava lluminositat als habitatges, i si l'edifici es veu des de l'aire, es pot contemplar com els patis interiors tenen l'aspecte d'un gran embut, absorbint l'aire i la llum per a l'edifici.



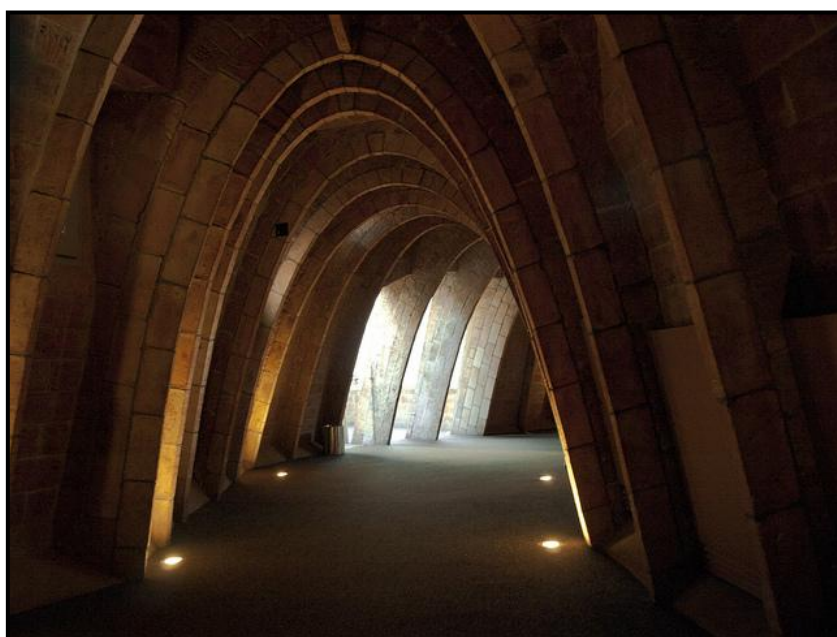


L'abolició total de murs de suport en la Pedrera, dona a l'edifici una estructura espacial molt variada i uniforme. Les línies rectes, les columnes i els suports desapareixen, i gràcies a aquesta configuració, les altures de cada habitatge són diferents. Res d'aquest edifici és uniforme, cada pis és únic. Tot això és possible degut a la utilització a la façana de la pedra aportant, la qual es queda alliberada de funcions de càrrega. Per tal d'aconseguir això, Gaudí connectava la façana a l'estructura interior de cada pis a partir d'unes jàsseres¹² de ferro corbes, les quals es distribueixen rodejant el perímetre de cada planta. Aquest sistema permet dona grans obertures a la façana per introduir-hi més lluminositat i l'avantatge de poder enderrocar una planta sense afectar en l'estabilitat de l'edifici.

Cal destacar el terrat de l'edifici, on es troben les singulars i capritxoses xemeneies que Gaudí ja va construir a la Casa Batlló. Unes xemeneies totalment estètiques que tenen forma de guerrer. En el terrat es troben 28 xemeneies, 6 sortides d'escala i 2 sortides de ventilació.



A les golfes és on es troba l'element principal d'aquest projecte, fet de maó. Una succió de 270 arcs catenaris que formen també una estructura auto sostenible. Aquests, s'uneixen per la clau de cada un dels arcs formant una espècia d'espina dorsal semblant a la de la teulada de la Casa Batlló.



¹² Bigues mestres o de suport



3.3.8. LA SAGRADA FAMÍLIA (1883 - encara en construcció)

Ningú, ni tan sols l'arquitecte contava que en aquell novembre de 1883, a l'edat dels 31 anys acceptés la direcció de les obres del que seria la seva obra culminant que romandria sota a càrrec seu fins a l'últim dia de la seva vida, quan va ser atropellat per un tramvia el 1926.

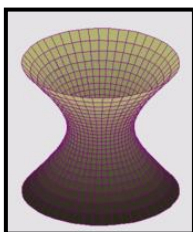
Per tal de poder realitzar la construcció de l'obra en el temps previst, eren necessàries unes 360.000 ptes. anuals, però el fet que l'església es tractés d'un temple expiatori, requeria que el finançament es produís a base de donatius. Això va portar seriosos retards en la seva construcció, com per exemple durant el transcurs de la Primera Guerra Mundial, que Gaudí hauria d'anar de porta en porta demanant diners. Actualment, gràcies als milions de visites i el gran renom arreu del món les obres van ben encaminades, amb l'objectiu de concloure-les l'any 2026 per tal de poder celebrar el centenari de la mort de l'arquitecte.

Un dels trets principals de l'església és l'enorme utilització d'escenes bíbliques les quals estan representades a les façanes. Aquest tret, demostra la tendència cada vegada més acurada cap al simbolisme, el qual cada vegada aniria més cap un simbolisme de caràcter religiós degut al interès que va adoptar per les construccions religioses.

Es té previst que el temple estigui format per un total de 18 torres, les quals representaran als 12 evangelistes, els 4 evangelistes, la Verge Maria i Jesucrist. Gaudí farà d'ús de l'arc catenari per realitzar les torres. El resultat d'aquest mètode farà que a mesura que la torre creix en altura, aquesta redueix la seva mida.



La torre principal que és la dedicada a Jesucrist serà la més alta de totes, amb una altura de 170 metres. Aquesta serà l'encarregada de donar llum a l'altar del temple, ja que el creuer¹³, segons Gaudí, és la zona més fosca del temple. Per això hi ha d'haver-hi un coronament d'aquest.



I així ho farà. Una altra de les innovacions del genial arquitecte va ser l'anomenada hiperboloide¹⁴. Va observar que utilitzant els cristalls adequats, podria fer passar la llum millor i aconseguir una lluminositat excel·lent la qual coronaria l'altar del creuer.

¹³ En una església de planta romànica (en forma de creu llatina), el creuer és la secció que intersecciona transversalment la nau principal.

¹⁴ Superfície generada per la rotació d'una hipèrbola al voltant dels seus eixos.



Aquesta llum que es transmetria a l'interior de l'església representaria la presència de Déu, ja que segons les paraules de Crist; "Jo sóc la llum".



L'església estarà constituïda per tres façanes; La Façana del Naixement, La Façana de la Passió i La Façana de la Glòria

Quan es va produir la mort de l'arquitecte, tan sols s'havia arribat a construir tres torres de la Façana del Naixement o també la de Llevant, situada a l'est.

- Façana del Naixement (Est). S'hi representava la vida terrenal de Crist.
- Façana de la Passió (Oest). S'hi representa la mort de Crist. Aquesta encara s'ha de finalitzar. A sobre de l'entrada formada per alts arcs catenaris, on es col·locarà una sèrie de columnes que representaran els ossos de Déu, amb l'objectiu de fer por.
- Façana de la Glòria (Sud). Encara no s'han començat les obres, i per tal de poder realitzar-les, serà necessari enderrocar els pisos davanters situats al Carrer Mallorca. Simbolitzarà la Resurrecció de Crist.

15



16



17



¹⁵ Façana de la Passió

¹⁶ Façana del Naixement

¹⁷ Maqueta d'una part de la Façana de la Glòria

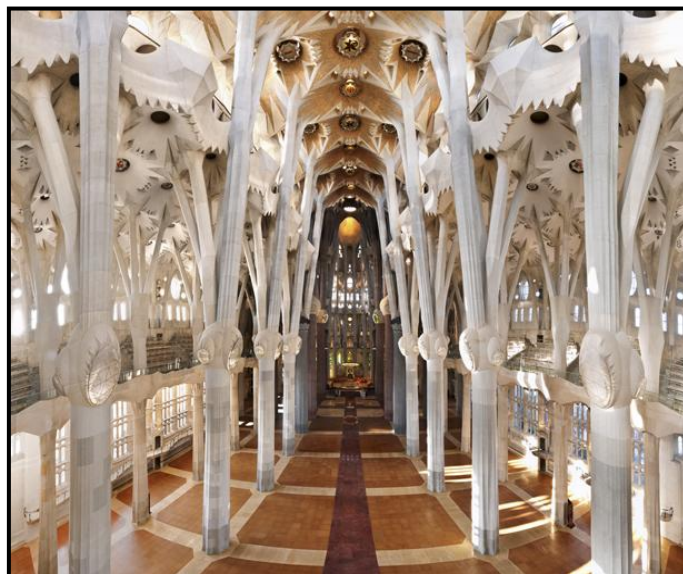


Inspirat en els processos que va realitzar per al disseny de la Colònia Güell, va decidir aplicar tals innovacions a la seva obra mestra. Aquesta obra és el millor exemple per poder refutar tota la teoria esmentada sobre l'arc catenari. Ja utilitza't en altres construccions a petita escala com per exemple a l'Escola Teresiana, Casa Batlló, etc., l'arc catenari serà l'element estructural principal de la immensa catedral, suportant totes les càrregues dels materials i les grans voltes, transmetent-les als fonaments sota terra. D'aquesta manera, fent ús de l'arc catenari i de la maqueta funicular, s'estalviarà els contraforts que tant poc li agradaven del gòtic. Aquelles "crosses" que donaven sobrepès a l'estructura en general.

Gaudí va més enllà, i combina tots els coneixements geomètrics amb els coneixements extrets de la natura al llarg la seva carrera. L'arquitecte va voler fer que la nau de l'església semblés un bosc. Inspirat en l'eucaliptu, cada una de les columnes principals es ramificava en 4 més, com si fos un arbre, i així successivament fins a arribar a formar arcs catenaris complets, tot i que no és possible veure'ls. El sostre és decorat amb fulles, que representen la copa de l'arbre.



Aquesta magnífica obra serà la més important de l'arquitecte i exemple clau de l'ús de l'arc catenari. Donen la sensació de no poder aguantar gaire pes, però Gaudí ha demostrat tot el contrari. I, a més de tenir unes propietats mecàniques úniques, donen una característica estètica de perpetuïtat, lleugeresa i un aspecte eteri¹⁸, com si les columnes no haguessin d'aguantar cap pes.



¹⁸ Delicat, subtil, vaporós



4. APLICACIONS DE L'ARC CATENARI

4.1. AVANTATGES I DESVENTATGES

En totes les construccions dutes a terme pel gran arquitecte durant l'època, en les quals l'arc catenari era un element clau en aquestes, han quedat totalment confirmades les útils i úniques avantatges que aquesta corba posseeix, i que cap altre té.

L'arc catenari va ser utilitzat per l'artista a principis de la seva carrera en els revestiments de les portes i finestres, com per exemple a la Finca Güell i més endavant a l'Escola de les Teresianes. Això permetia no haver d'emmarcar la porta i revestir-la directament amb l'arc. A més, els materials que utilitzava eren de fàcil utilització, com és el maó, material que Gaudí dominava a la perfecció, a més del ferro.

La catenaria com a element estructural, dóna al mateix temps diferents avantatges per a l'obra. La primera i com ja se sap, la no utilització de contraforts i/o boterells que aporta a l'obra, permet que aquesta tingui un pes menor.

Al produir-se tensions horitzontals just al peu de l'arc, per tal de poder minimitzar-les al màxim, Gaudí creava arcs de grans dimensions. Aquest fet, permetia que l'arc salvés més llum, una major distància i conseqüentment, la seva resistència augmentava. Sobretot si a aquest se li aplicaven els saquets per calcular els punts màxims de tensió que suportaria l'estructura.

El nombre d'avantatges que té respecte les desavantatges, si es que en té, són molt majors. L'única cosa que podríem destacar del seu desús al llarg de la història és que abans es considerava poc elegant.

4.2. OBRES MODERNES AMB L'ARC CATENARI

Des de la demostració de la bellesa, les avantatges i les múltiples aplicacions que va ensenyar l'arquitecte català, l'arc catenari està passant a ser considerat una estructura realment moderna degut a la forma que té i l'estil arquitectònic que s'està donant actualment. Aquest estil continua sent de caràcter minimalista, però a més de la simplicitat i les línies rectes ha afegit a les seves característiques la curvatura.



4.2.1. CATENARIA EN PONTS

4.2.1.1. VIADUCTE EMBASSAMENT DE CONTRERAS

Catenària invertida.



4.2.1.2. GOLDEN GATE (San Francisco, Estats Units)

Catenària no invertida.





L'arquitecte Santiago Calatrava ha fet un gran ús d'aquesta corba. Aquests són uns exemples.

4.2.2. BODEGA YSIOS (Lagarida, País Vasc)

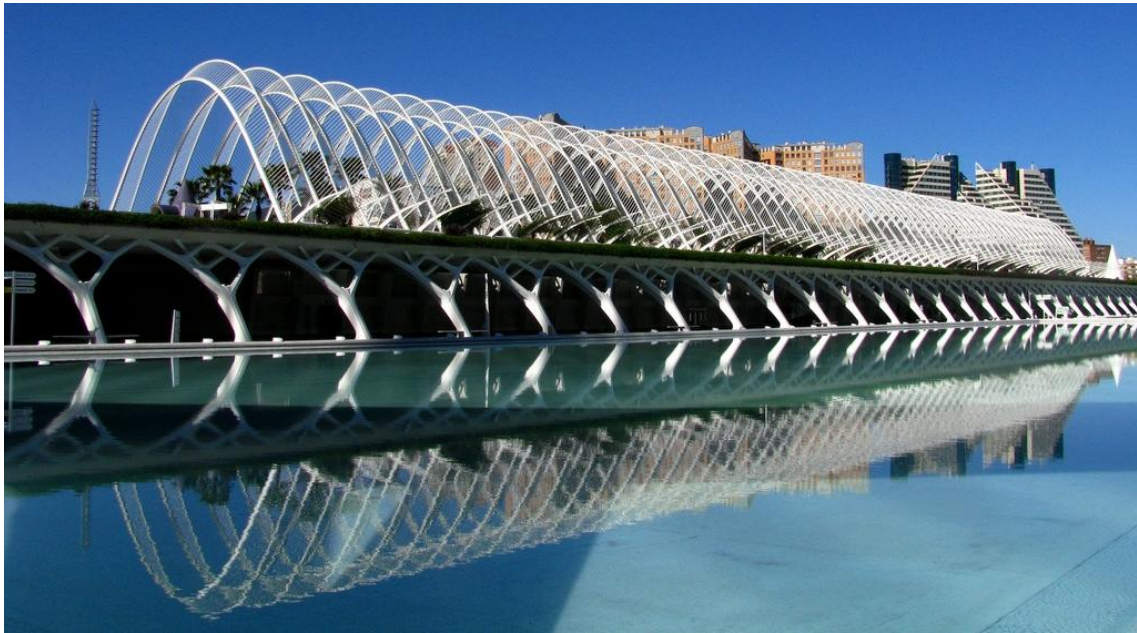


4.2.3. OCEANOGRÀFIC (València)





4.2.4. UMBRACLE Museu de Les Arts i de Les Ciències de València.



Oscar Niemeyer, arquitecte brasiler, també ha utilitzat aquesta peculiar corba.

“When you have a large space to conquer, the curve is the natural solution”¹⁹. – Oscar Niemeyer.

4.2.5. ESGLESIA DE SAN FRANCISCO (Pampulha, Belo Horizonte, Brasil)



¹⁹ Quan tens un llarg espai que conquerir, la corba és la solució natural.



4.2.6. GATEWAY ARCH (Saint Louis, Missouri, Estats Units)

Dissenyat per l'arquitecte Eero Saarinen, és l'estructura amb forma catenària més gran del món i el monument més gran dels Estats Units d'Amèrica amb una amplada i una altura de 192 metres.



MARC PRÀCTIC



0. INTRODUCCIÓ

L'arc catenari es únic per la sorprenent característica de tenir estabilitat i mantenir-se en equilibri sense necessitat de contraforts. Gaudí el va aplicar a grans construccions com la seva obra mestra, la Sagrada Família, la qual està formada principalment per arcs catenaris que suporten el pes de l'estructura completa.

L'objecte (o finalitat) del meu projecte és comprovar que l'arc de mig punt necessita de contraforts per no caure o trencar-se i l'arc catenari no. Per tal de demostrar-ho he realitzat l'estudi d'ambdós arcs i, aplicant la teoria apresada, construiré un arc de cada tipus.

Respecte a l'arc de mig punt, en comptes de fer un en faré dos: un amb pastilles de sabó i l'altre amb fang refractari. El primer material em permetrà modelar-lo amb la forma que vull i el segon, al ser molt semblant al ciment, simularà una construcció de veritat.

Abans de començar a construir realitzaré uns càlculs previs per determinar la longitud, inclinació i el nombre de dovelles que necessitaré donant un radi inventat anteriorment per fer la semicircumferència. Una vegada s'hagin fet els càlculs i dibuixades les dovelles que faré servir com a model, procedeixo a construir el primer arc amb pastilles de sabó. Aquest arc em servirà per demostrar la necessitat de contraforts als costats perquè s'aguanti.

Amb les mateixes dades construiré el segon arc utilitzant fang refractari i, tal com indicava, el resultat serà molt semblant a una construcció de veritat.

Una vegada acabats, procediré a fer l'arc del qual tracta aquest projecte, el catenari, intentant ser el màxim fidel possible a la metodologia que aplicava Gaudí. Amb l'ajut unes bates i un suplement vitalici i construiré l'arc amb guix, material que utilitzava per a fer les maquetes de la Sagrada Família i les diferents parts d'aquesta.



1. CONSTRUCCIÓ DELS ARCS

Un cop analitzades les característiques de cada un dels arcs procediré a realitzar la part pràctica del treball.

El primer arc que faré serà el de mig punt i, abans de construir res, realitzaré els càlculs detallats a continuació i donaré unes dades per saber com serà la futura estructura.

1.1. ARC DE MIG PUNT

1.1.1. CALCULS PREVIS

El primer pas es definir un radi inventat que representarà l'espai o la llum²⁰, la qual serà de 30 cm de diàmetre. Tenint la seva mesura, amb el compàs es dibuixa en un paper un arc de 180° de 15 cm de radi i es determina la mesura de la dovella, que serà de 5 cm de base per 5 cm d'amplitud. Per tant, s'obra el compàs fins a 20 cm., mesures factibles per a donar com a resultat un arc a petita escala però de mides raonables.

Ara només falta especificar el nombre exacte de dovelles per les quals estarà format l'arc. Per no fer-ho complicat, es posa el transportador d'angles sobre el centre de l'arc dibuixat, i des del principi d'aquest, es fa una marca cada 20°. Des del seu centre, es traça una línia fins al punt i es prolonga fins al final. Així, l'arc queda dividit en 9 cordes²¹ iguals.

Per tal de saber quina és la longitud de l'intradós i l'extradós i sabent que la fórmula per calcular el perímetre és $2\pi\text{Radi}$, se segueix el procediment següent:

- INTRADÓS (radi=0.15m)
 - $2 \cdot \pi \cdot 0.15 = 3/10\pi \text{ m}$ -> Mesura del perímetre complet
 - $3/10\pi / 2 = 3/20\pi = 0.4712\text{m} = \underline{47.12\text{cm}}$ -> Es divideix la mesura anterior a la meitat, degut a que l'arc és la meitat d'una circumferència. Aquesta és la mesura de l'intradós complet.
 - L'intradós és dividit entre 9 per saber la longitud de cada dovella. -> $47.12 / 9 = \underline{5.23\text{cm}}$

²⁰Vid. Punt 1 Components d'un arc. Distància que salvarà l'arc.

²¹Corda: Segment d'un arc



Seguint el mateix procediment utilitzat per calcular l'intradós, s'obtenen les diferents mesures de l'extradós.

- EXTRADÓS (radi=0.2m)
 - $2 \cdot \pi \cdot 0.2 = 2/5\pi$ m -> Perímetre de la circumferència
 - $2/15 / 2 = 1/15\pi = 0.6283$ m = 62.83cm -> Mesura de la semicircumferència
 - $62.83 / 9 = 6.98$ cm -> Mesura de cada dovella

1.1.2. ARC DE MIG PUNT DE SABÓ

Un cop realitzats els càlculs vaig centrar-me en el material amb el qual podia construir l'arc.

Havia de ser un material que fos fàcil de treballar i assequible com podia ser l'espuma o suro blanc però em vaig adonar que, si utilitzava un d'aquests materials, el resultat final seria un arc massa lleuger. Em van suggerir les pastilles de sabó, material que podia comprar o, si més no, fabricar jo mateix; barat, consistent dins les seves limitacions i, a més a més, fàcilment modelable. Amb totes aquestes característiques a favor seu va ser el triat.

MATERIALS I EINES

- 9 pastilles de sabó
- Cúter i ganivet gran
- Espàtula
- Model de paper de la dovella
- Esquadra





PROCÉS DE CONSTRUCCIÓ

Amb els model de dovelles retallats en paper es comença el procés. Aquest no és gaire complicat de fer, per això no hi ha gaires passos.

MODELATGE DE LES DOVELLES

PROCÉS

Posar model de paper sobre la peça de sabó.

FOTOGRAFIA



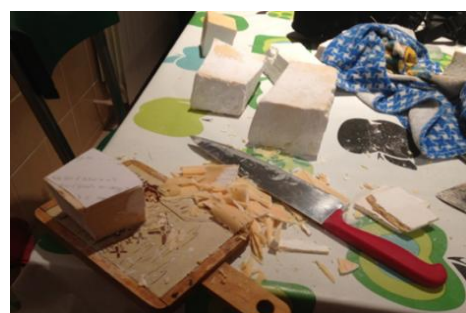
Modelar amb ajuda de l'espàtula, ganivet i cúter.



Comparació de la dovella feta amb el paper.



Seguir aquest mateix procés per fer les dovelles que falten.





DIFICULTATS

Per la realització d'aquest arc, he trobat una sèrie de dificultats que m'han obstaculitzat el modelatge. Aquestes són les següents:

- Forma irregular del sabó. Les pastilles que he utilitzat han estat fetes manualment i cada una d'elles tenia una forma diferent. Una podia ser molt gran i d'aquesta podia fer dues dovelles, o una altra podia ser molt justa per tallar-la.
- Textura dura. Encara que m'havien dit que el sabó era fàcil de treballar, al ser dur vaig haver de fer molta força amb l'espàtula o el ganivet per tallar-lo i això va dificultar poder donar-li la forma de cunya que necessitava.
- Estabilitat. La irregularitat que també presentaven les dovelles ja tallades complicava la construcció de l'arc; si no es posicionaven les dovelles més grans a baix i les més petites cap a dalt amb la clau i les contraclaus, l'arc queia cap als costats. A més, el coeficient de fregament²² que té el sabó una vegada tallat és molt poc, i a l'hora de posar una dovella sobre l'altre, la de dalt relliscava i es queia. Per això vaig necessitar a una altra persona perquè aguantés les altres i jo pogués posar les que estaven més amunt.



²²Coeficient de fregament o fricció: Oposició al desplaçament que presenten les superfícies de dos cossos quan entren en contacte l'un amb l'altre.



1.1.3. ARC DE MIG PUNT DE FANG REFRACTARI

Abans de començar a construir l'arc de sabó, ens vàrem plantejar la possibilitat de fer un segon arc. Volíem que s'assemblés més a una construcció de veritat, encara que fos a petita escala, i no semblés de joguina; per això la meua tutora i jo vàrem decidir utilitzar fang refractari i ciment, per fer-ho encara més real. El fang refractari, conegut popularment com a fang vermell, s'utilitza majoritàriament per a fer barbacoes, tot i que és la totxana refractària el material més utilitzat per aquest menester.

Les seves proporcions són les mateixes que l'arc de sabó; un arc amb una llum de 30 cm de diàmetre i unes dovelles de 5 cm tant d'ample com de llarg. Així que passarem directament als materials, les eines i a construir el difícil arc.

| MATERIALS | | EINES | | |
|---------------------------|---------|----------|--------------|-----------|
| Totxanes refractàries | Fullola | Caladora | Radial | Loctite |
| Fang refractari | Ciment | Tornavís | Tisores | Trepant |
| Làmines de PVC | Claus | Silicona | Cubell aigua | Tisores |
| Taula de fusta aglomerada | Sorra | Regla | Compàs | 5 cargols |
| Aigua | | Llapis | | |

PROCÉS DE CONSTRUCCIÓ

El procediment que anava a seguir per fer aquest arc era el convencional: amb el material que triés faria diferents motlles, un per cada dovella, hi posaria el fang refractari i després, una vegada sec, els trauria i muntaria l'arc.

Comentant el procediment amb el meu oncle, em va explicar una altra manera de fer-lo molt més ràpida atès que s'hauria de fer un sol motlle i, un cop analitzats els avantatges i els inconvenients, em vaig decantar per aquesta. És la següent:

MOTLLE

El primer pas és construir el Cindri.

Amb un compàs es dibuixa sobre dues fulloles una semicircumferència d'un radi de 15 cm. i es tallen utilitzant la caladora; un cop tallades s'agafa una làmina de PVC de 5 cm. d'amplada, que és una mida perfecta per fer les dovelles amb el fang, i amb ajuda, es doblega i s'uneix a les fulloles. Per fer-ho, a mesura que es va doblegant donant-li la forma de la semicircumferència,



si posa pega (Loctite) en la zona en contacte amb la cara interior d'ambdues fulloles i s'enganxa amb cinta adhesiva per la cara externa per reforçar; a més, s'han d'ajuntar els dos extrems inferiors de la làmina per evitar que se separi, degut a què aquesta tendeix a tornar al seu estat quan es deforma.

Aquest és el resultat:



Utilitzant el trepant, es fan dos forats a la part de la làmina de PVC que sobresurt. A cada un d'aquests forats si col·locarà un cargol que ajudarà a reforçar la làmina que s'haurà de posar després i, a més, determinarà la distància de separació entre totes dues. Aquesta separació donarà la mida de les futures dovelles atès que serà el motlle que s'utilitzarà. Es forada per una part la làmina esmentada i s'uneix amb el cindri introduint els dos cargols per als seus respectius forats; ja assegurat un cantó, es continua donant forma a la tira de PVC.



Es fa un forat just al centre i s'hi posa un altre clau a 5 cm. Es continua doblegant fins a arribar a l'altre extrem, on també se'n fa dos forats més per acabar de tancar el que serà l'extradós de l'arc.

El següent pas és fer les separacions per poder posar més endavant el fang refractari i fer les dovelles. Primerament, amb el model a paper que s'havia fet de la semicircumferència del cindri, es marca on s'ha de posar cada una de les peces; a continuació, al tros que sobra de la làmina de PVC es fan marques cada 5 cm. (11 en total) i, utilitzant la radiant, es talla per la part guixada obtenint així 10 peces per posar en el motlle. Aquestes peces, com ja s'ha esmentat, tindran la funció de delimitar cada dovella.



Ja fetes les marques i tallat el PVC, es procedeix a col·locar-les al lloc corresponent. S'agafa una peça i es posa on hi hagi una marca recta mantenint-la tal com ha d'anar; amb l'altra mà s'aplica Loctite perquè s'enganxi bé a la base i, quan ja s'ha assecat, s'aplica pega de nou per enganxar-la a l'extradós. Es repeteix la mateixa operació amb totes les altres peces fins a tenir el motlle preparat.

DOVELLES

Una vegada ja està fet el motlle, es pot començar a treballar amb el fang refractari. Per poder tractar amb ell, primer ha de passar de ser una massa sòlida a una que sigui quasi líquida. Per això es tallarà un tros del bloc de fang i es deixarà reposar en un cubell d'aigua fins que estigui suficientment tou.

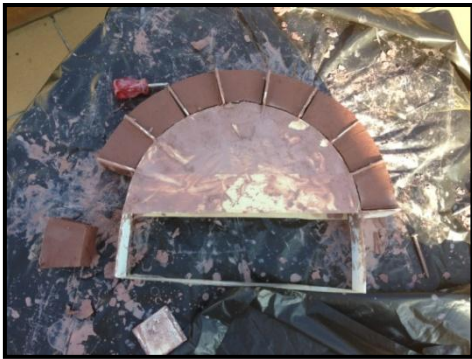


Quan el fang té la consistència adequada per treballar amb ell, es procedeix a dipositar amb molta cura i a trossets petits la massa en cada un dels compartiments del motlle, assegurant que es recobreix del tot cada espai per evitar que, en treure el fang una vegada sec, quedin espais buits. Amb una espàtula, s'aplana el que sobresurt de cada dovella i es deixa al mateix nivell que el cindri per tal que quedi pla i recte.





Una vegada solidificat, es treuen els claus que s'havien posat al principi i lentament es treu la tira de PVC de l'extradós. Un cop estreta, ja es poden retirar les dovelles.



ARC

L'últim pas que queda és aixecar l'arc sobre els contraforts. El mètode tradicional seria començar col·locant els contraforts i, a sobre de cada un, posar les dovelles una per una però es muntarà d'una manera més ràpida i senzilla.

Per enganxar les dovelles i les totxanes s'utilitza ciment. Les proporcions adients per preparar la barreja són una quarta part de ciment, tres de sorra i aigua (una petita quantitat donat que ha de ser espessa, no aigualida).



Un cop feta la barreja es procedeix a muntar tot l'arc. Per fer més ràpida la construcció, s'aplica ciment a les dovelles i, recolzades sobre una superfície plana i llisa, s'enganxen i es deixa reposar el ciment. Anteriorment, **com que el fang refractari tendeix a encongir-se**, utilitzant unes petites peces de plàstic es determina la distància a la qual s'ha de separar cada dovella per posar el ciment entre elles.



Es marca el centre del tauló de fusta aglomerada i s'hi fan unes marques que delimitin la posició en la qual s'hauran de posar els contraforts (les totxanes refractàries) per tal de que l'arc quedi centrat. La base sobre la que s'enganxarà és una placa de fusta i, atès que el ciment no enganxa bé sobre ella, s'utilitzarà silicona per assegurar que no es desenganxin; per les dues superiors s'apliquen ambdós materials per reforçar la subjecció i mantenir l'estètica del conjunt.

Una vegada ja està tot sec, s'aplica una mica de silicona i ciment als dos extrems de l'arrencada²³, pels voltants; a sobre es col·loca l'arc i es deixa reposar perquè s'assequi i s'enganxi bé. Per últim, amb un raspall i una esponja es poleix bé traient el ciment que sobresurt entremig de les dovelles.

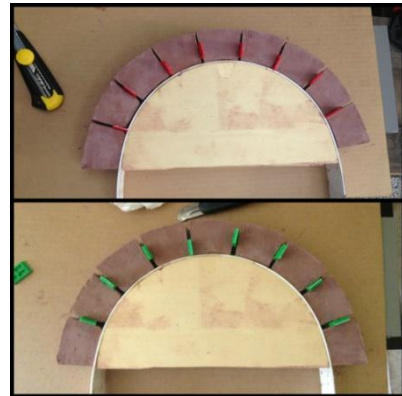


²³ Vid. Punt 1 arrencada



DIFICULTATS

- Doblegament de les làmines de PVC. El PVC és un material elàstic, una vegada deformat tendeix a tornar al seu estat original amb el qual, a l'hora de construir el cindri, es necessita l'ajuda d'una segona persona per poder modelar la làmina i enganxar-la als trossos de fullola.
- Ciment. La sorra que s'ha utilitzat en aquest arc, és sorra de platja i no l'específica per fer la barreja; aquest fet va dificultar la unió de les dovelles atès que el ciment resultant no era 100% resistent i va requerir fer us de la silicona per reforçar la unió entre dovelles i totxanes.
- Encongiment del fang refractari. Una de les propietats del fang refractari és la reducció de la seva mida un cop està sec; si no es té en compte aquesta característica a l'hora de la seva manipulació, pot succeir, com va ser el cas, que el resultat final no sigui el previst, implicant nous càlculs. En concret, al ser més petites les dovelles, no es va poder mantenir la distància prevista inicialment entre elles i, mitjançant simulacions, es va determinar la nova separació a fi que l'arc tingués les mesures correctes.



TRENCAMENT DE L'ARC.

Tot i que van sorgir diferents dificultats durant el procés de construcció, el problema més greu es va presentar un cop finalitzat l'arc quan, en el moment del seu transport al jardí per tal de fer unes fotografies, una de les cantonades de la taula aglomerada va colpejar contra la paret provocant que l'arc caigués completament.





En aquests moments el dubte principal va ser si s'hauria de construir de nou. Després de reflexionar sobre diferents possibilitats vaig trobar una solució per tal de no haver de muntar un arc de nou, tot i que potser hagués estat el millor perquè tornés a quedar perfecte.

El primer pas va ser enganxar les dovelles amb silicona i fibra de vidre (material encara més resistent que aquesta) començant amb els dos trossos que es van mantenir units després del xoc i continuant amb la resta. Un cop unides, es van recobrir amb fang refractari del sobrant totes aquelles zones on hi havia manca, ja fos a la contraclau esquerra (dovella esmicolada de la imatge inferior) com a qualsevol altra.

Per subjectar l'arc i evitar que es desplaçés es va col·locar un serjant a cada un dels costats i un objecte qualsevol al centre. Amb l'estabilitat aconseguida, es va deixar reposar la silicona i la fibra de vidre a fi de que s'assequessin i asseguressin bé l'estructura interna per finalment, amb una nova barreja de ciment, reforçar els espais entre les dovelles.





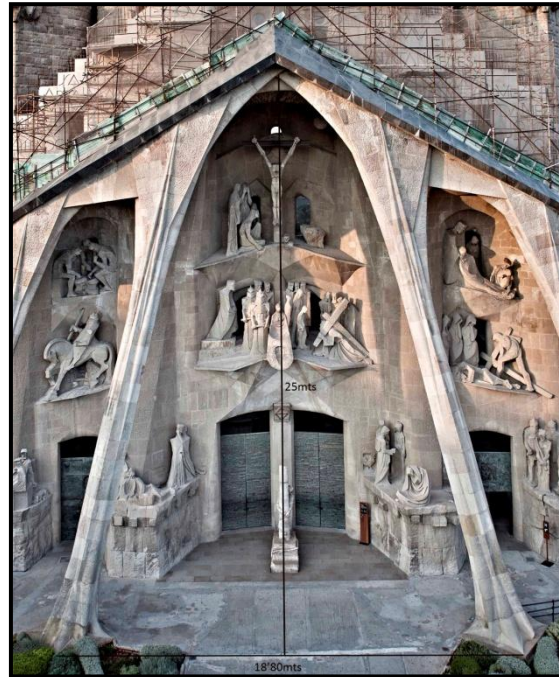
1.2. ARC CATENARI

Després de llarga experimentació amb l'arc de mig punt deixem de banda les dovelles i els seus pesants contraforts per centrar-nos en la pràctica de l'objecte principal d'aquest treball; **l'arc catenari**.

CÀLCULS PREVIS

Donada la complexa forma que presenta aquest arc, són necessàries unes noves mides per poder construir-lo. Per ser més fidels als models del propi arquitecte es va optar per realitzar l'arc catenari a escala reduïda d'un ja existent.

L'arc escollit és el més gran que hi ha a la Façana de la Passió de la Sagrada Família. Les seves mides van ser facilitades pels encarregats de l'Oficina Tècnica del Temple; 25 metres d'alçada partint des de la mediatriu de la llum fins al punt més alt de l'arc, i 18,8 metres d'amplada (llum).



Amb aquesta útil informació, podrem saber l'escala adient amb la qual es farà l'arc. Sabent que l'escala és el nombre de vegades que s'ha ampliat o reduït un objecte en un plànol o en la construcció, es procedeix a calcular l'escala de l'arc.

Donant una mida que sigui múltiple als 2500 cm. que mesura l'arc de la Façana de la Passió per així obtenir una escala normalitzada, com 50 cm., i coneixent que la fórmula per calcular una escala és $E=D/R$, on D és el dibuix i R l'objecte a la realitat, es calcula la seva escala de reducció.

- $E=D/R$; $E = 50/2500$; $E=1/50$ -> Escala de reducció $E=1:50$
- Amplada real / Reducció; $1880 / 50 = 37,6$ cm -> Mesura de l'amplada del arc reduït.



| MATERIALS | | EINES | |
|-----------------|------------------|----------|---------|
| Bares d'alumini | Cordill | Claus | Celo |
| Cadena | Làmina de Cartró | Secador | Regla |
| Làmina de PVC | Llistó | Llapis | Trepant |
| 4 kg d'Escaiola | Aigua | Espàtula | Cubell |
| | | Cinta | |

CONSTRUCCIÓ DE L'ARC CATENARI

En honor al seu creador i màxim exponent del Modernisme català, Antoni Gaudí, el seu procés de construcció, com ja s'ha dit anteriorment, serà el màxim fidel possible al mètode aplicat pel gran arquitecte.



Gaudí utilitzava un suplement vitalici on penjava les cadenes i donava forma a l'arc i la futura estructura. Però, degut a la falta de tals materials, la cadena es penja de dues bares d'alumini amb una punxa als seus extrems. Per fer l'arc, es lliga un cordill que uneixi les dues bares amb una alçada de 50 cm. des del seu extrem superior i a una distància de 37.6 cm. per evitar que la cadena es desplaci més de la distància que s'ha calculat i utilitzant celo, s'hi ha

fet una marca al seu punt d'inici i final per tal de mantenir-los constants.

En una làmina de cartró llisa es posen dos claus a la distància que tindrà l'arc, i es traspasa la cadena de les bares als dos claus. Per tal de poder dibuixar l'arc, es col·loca el cartró repenjat contra la paret amb la cadena penjant, i amb el màxim de cura possible, passem la punta d'un bolígraf o llapis per cada un dels forats de la cadena deixant marcat l'arc. Després d'haver-ho fet en tots els punts, es repassa l'intradós amb l'estri utilitzat.

Cada una de les bases de l'extradós serà de 7 cm. d'amplada, i s'anirà reduint fins al punt mig de l'arc, on acabarà tenint una amplada de 5cm. Per això, des del centre de la base es traça una perpendicular que es prolongui fins al final, fent una marca a la distància esmentada. La cadena s'haurà d'obrir o tancar fins que concordi amb les



marques dibuixades en el cartró. Repetint el procés anterior, s'obté l'extradós i l'arc complet. Aquest dibuix serà el model per poder construir el motlle, el qual serà del mateix material que l'arc de mig punt, PVC, i amb un procés de construcció bastant semblant.

Degut a la tancada corba que genera la catenaria, és necessària la utilització d'un secador per escalfar el material i poder deformar-lo més. Per evitar que una vegada fred s'obri, també s'uneix amb cinta adhesiva seguint el model del cartró, i als extrems, també per prevenir que s'obri, s'hi clava un llistó, juntament amb dos petits trossos de PVC que faran de base de l'arc.



El mateix procés és realitzat per l'extradós, però en comptes de posar un llistó i cinta, a la part interior i exterior s'hi clavaràn 9 claus que delimitaran l'obertura de la làmina de l'extradós.

Amb el motlle ja acabat, es prepara tot el material i eines per fabricar l'arc. Gaudí utilitzava filferro o cable amb el qual donava manualment forma a l'arc i guix. En aquest, s'ha fet servir un filferro llarg i gruixut amb la forma de la catenaria (per fer la funció d'estructura interna)

L'arquitecte utilitzava (i actualment encara s'utilitza) el guix. Però aquest ha estat substituït per l'escaiola, material amb les mateixes característiques i l'avantatge que tarda uns minuts més a assecar-se, molt positiu en el cas de que sorgeixi un contratemps en el procés de construcció.



L'escaiola té un reduït temps d'asseccament i, per tant, el procés de barreja ha de ser molt ràpid per evitar que la que s'ha posat primer s'assequi abans de posar la següent. Això implica tenir tots els ingredients (escaiola, aigua, cubell, filferro i espàtula) a l'abast amb tal de no parar un cop es comença i, si es pot, fer-la amb ajuda per economitjar temps. Les proporcions son 250

mm. d'aigua per cada kilogram de pols.



En un cubell s'avoca el primer kilogram de pols, i es tirà un got ple d'aigua i es barreja amb l'ajuda de l'espàtula. Una vegada realitzada la mescla, es tira dins el motlle començant des d'un dels dos extrems recobrint totes les parts possibles perquè no quedi cap bombolla d'aire ni cap espai.



Es barreja el següent kilogram d'escaiola, s'avoca recobrint tota la part inferior del motlle i es col·loca el filferro per evitar que es vegi un cop finalitzat, atès que quedarà cobert amb les següents capes.

Seguint el mateix procediment, s'acaben de barrejar els dos kilograms restants d'escaiola i s'avoquen al motlle, cobrint i tancant definitivament l'arc, i amb l'escaiola que ha sobrat es repassen aquelles parts on han quedat petits espais o arrugues.



Amb molta cura es treuen les làmines de PVC dels voltants i deixem reposar l'estructura fins que s'hagi assecat completament. Una vegada ja està seca i amb el motlle extret, amb una esponja i paper de vidre repassem els contorns.

DIFICULTATS

Aquest arc no ha suposat gaires complicacions, atès que el procediment era ràpid, específic i no gaire complicat.

L'única dificultat que sí que puc destacar és a l'hora de confeccionar el motlle. La zona on es corba l'arc és molt més tancada, i donar aquesta forma a la làmina de PVC era molt difícil atès que tenia molta força i s'obria. Per això era necessari utilitzar un secador per poder doblegar-la i, seguint les línies del cartró, amb l'ajuda de celo s'unia per evitar que s'obris.

A més a més, va sorgir un imprevist en el moment en què es dipositava l'escaiola en el motlle. I es que al no tenir les bases ben subjectades als marges del motlle, una de les bases va quedar torçada. Tot i això, l'arc s'aguanta perfectament.





2. ENTREVISTA A LA SAGRADA FAMÍLIA

Com ja s'ha pogut veure en la teoria, l'arc catenari no ha estat un arc gaire treballat en el món de l'arquitectura. Degut a aquest factor, la majoria de la informació que podia trobar mentre realitzava la part teòrica de la catenaria de caràcter matemàtic, no arquitectònic.

Un cop arribat a un cert punt de la teòrica, no vaig poder continuar a causa de l'escassa informació existent, ja fos a Internet o a la Biblioteca de l'Escola Tècnica Superior Arquitectura de Barcelona (ETSAB), la qual vaig visitar anteriorment per documentar-me, tot i que aquesta visita va ser en va. Això és degut al fet que l'estil que s'ensenya és un estil més de caire minimalista diríem, i el Modernisme de Gaudí era tot el contrari a aquest.

Per aquest motiu vaig decidir buscar informació anant a visitar l'obra magistral del propi arquitecte, reconeguda a escala mundial, on l'arc catenari és l'element principal de sosteniment de la seva estructura; la Sagrada Família.

Afortunadament, vaig tenir la sort de concertar una entrevista amb la Secretaria de l'Oficina Tècnica del Temple, Nuria Sabaté. Ella em va proporcionar tota la informació necessària per continuar.

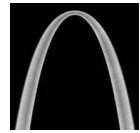
Tot i conèixer ja algunes de les respostes de les preguntes que es van formular, era adient preguntar-les per poder enllaçar cada una d'elles. Aquestes són les preguntes:

ARC CATENARI

- Què és l'arc catenari?
- Com actuen les forces per tal que aquest s'aguanti sense contraforts?
- Diferència entre l'arc catenari amb pesos o sense?
- Per què s'utilitzaven els pesos?
- És preferible utilitzar un d'ells abans que l'altre?
- Quins avantatges i desavantatges té aquest arc respecte a l'arc de mig punt?
- Si té tantes avantatges, per què no s'utilitza?

MAQUETA I CONSTRUCCIÓ REAL

- Com i amb quins materials feia servir Gaudí?
- Com feia la maqueta?
- Com i quins materials utilitzava Gaudí més sovint per a la construcció real?



LA MEVA MAQUETA

El meu objectiu és representar a escala l'arc més gran de la façana de la Passió.

- Quines són les seves mides reals?
- Com el puc fer?
- Gaudí li va posar algun pes a la cadena o tan sols es forma a partir de la cadena caient sola?



IV. CONCLUSIONS

En aquest treball s'ha volgut determinar quin era el factor clau que ha portat a que l'arc catenari, després de la seva aparició al Modernisme Català i la seva explotació per part de l'arquitecte Gaudí, hagi caigut en desús i s'hagi utilitzat poc en les construccions de l'últim centenari.

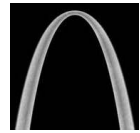
Per tal d'arribar a obtenir una resposta per a la pregunta formulada, he realitzat una experimentació que consisteix en construir a una escala molt reduïda un arc de mig punt a partir de fang refractari, material molt semblant que s'utilitza a les construccions reals per tal de simular el màxim una construcció real. I un segon arc, un catenari amb guix per reproduir les maquetes realitzades per l'arquitecte en els seus anys de vida.

Mitjançant aquesta experimentació, he tingut oportunitat de posar-me en la pell d'un paleta, construir els meus propis arcs i comprovar si el desús de l'arc catenari ha estat degut a un problema en l'àmbit constructiu. He pogut constatar que la construcció de l'arc catenari no era tan difícil com esperava; fins i tot, l'he trobat més senzilla que la de l'arc de mig punt, degut sobretot al fet que no he trobat tantes traves com amb l'arc romànic.

No obstant, s'ha de tenir en compte que aquests arcs estan fets a una escala molt reduïda i, per aquest motiu, no es pot comparar el meu procés amb una construcció real, com per exemple els arcs catenaris de més de 40 metres de la Sagrada Família.

A mesura que he anat realitzant la part pràctica i redactant el marc teòric al mateix temps, m'he adonat de que la resposta no es troba a l'estructura de l'arc, sinó al carrer. Si donem un cop d'ull als edificis de les grans ciutats o als edificis més emblemàtics que s'han construït en l'últim centenari, podem apreciar que la majoria d'ells no presenten corbes a la seva estructura.

Això és degut a què després de que esclatés la Primera Guerra Mundial, va sorgir un moviment arquitectònic fundat a l'Escola de Bauhaus a Weimer, Alemanya, per Walter Gropius; el **Racionalisme**, el qual defensa el funcionalisme de l'edifici, l'absència de decoració i la predilecció per a les formes geomètriques simples, característiques totalment contraries al què és la catenària i que han contribuït a que caigués en desús.



Malgrat aquesta tendència, cal dir que l'estil arquitectònic en aquests últims anys està canviant i està donant pas a formes corbades com és la catenària. Arquitectes com Oscar Niemeyer, Santiago Calatrava i molts altres han i estan incorporant la curvatura en les seves obres més actuals.

Per tant, puc afirmar que la raó del desús de l'arc catenari és tan sols un motiu estilístic.



V. NOVES VIES DE RECERCA I PROPOSTES DE MILLORA

Degut a l'ampli món al qual pertany el tema del meu treball, al llarg de la seva elaboració han anat sorgint diferents idees relacionades amb Antoni Gaudí i el Modernisme Català.

Aquestes són les noves vies de recerca:

- Estudi de la simbologia i naturalesa de la Sagrada Família.
- Estudi de la llum a l'Església de la Sagrada Família.
- Què aporten a l'arquitectura les formes inventades per Gaudí; paraboloides, hiperboloides i catenària.
- Investigació de la cúpula del Partenó. Com pot aguantar sense clau?

PROPOSTES DE MILLORA

Tant com en acabar el treball com en el transcurs d'aquest, se m'han formulat algunes propostes que haurien estat molt satisfactòries per aquest treball, les quals no s'han pogut realitzar degut o bé a una falta de temps o de coneixement.

- Realització d'un arc catenari amb peces de fusta.
- Realització d'un estudi posterior de les forces tangents que actuen en l'arc catenari construït per mi.
- Disposició de la teoria i els coneixements adequats abans de començar a redactar per evitar encallaments durant el redactat.
- Realització de plànols dels arcs.



VI. BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

Llibres:

- Rainer Zerbst. *ANTONI GAUDÍ. Obra Arquitectónica Completa*. Editorial Taschen. Edición Aniversario Taschen. 2009.
- Francisco Moreno García. *Arcos y bóvedas*. Ediciones CEAC. 2004.

Tesi Doctoral: Geometria i Mecànica en els models de Gaudí

Pàgines d'Internet:

- http://recursos.educarex.es/escuela2.0/Humanidades/Historia/la_obra_de_arte/arquitec/arco.htm
- <http://ficus.pntic.mec.es/apem0032/arcos.pdf>
- <http://www.albaiges.com/ingenieria/arco.htm>
- <http://arquitecturaenconstruccion.blogspot.com.es/2008/06/historia-del-arco.html>
- <http://arcos25.blogspot.com.es/>
- http://www.fisicarecreativa.com/taller/guias/Cap10_Catenarias.pdf
- <http://www.pagina12.com.ar/diario/suplementos/futuro/13-2054-2008-12-10.html>
- <http://ivanbarrero.blogspot.com.es/2009/11/diferencia-entre-catenaria-y-parabola.html>
- <http://www2.fe.ccoo.es/andalucia/docu/p5sd5274.pdf>
- http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/ESTUDIO_Y_APLICACIONES_DE_LA_CATENARIA
- http://www.aq.upm.es/Departamentos/Matematicas/profesor/moratalla_a/Locos%20Matemt/Los%20alumnos%20participan/Catenaria.pdf
- <http://visible-art.com/userfiles/file/Architectural%20Magazines/Gaudi.Geometria.pdf>
- http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/INFORME_CATENARIA
- <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14777574/Arco-Catenario-Creando-ConCiencia.html>
- http://cafraz.blogspot.com.es/2010_09_01_archive.html

Videos:

- TV3. Quèquicom. *Gaudí i les forms de la naturalesa*.
<http://blogs.tv3.cat/quequicom.php?itemid=36195&catid=2026>
- RTVE. *Gaudiana*.
<http://www.rtve.es/television/20091109/gaudiana/300028.shtml>
- Construcció d'un arc de mig punt.
<http://www.youtube.com/watch?v=sKBsXCJeirM>

“Les meves idees són d’una lògica indiscutible.

El que em fa dubtar és que no hagin estat aplicades anteriorment”

Antoni Gaudí