

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

*Arquitecte. President de la Fundació Antonio Gaudí

Informació de l'article:

Data de publicació: 6 de juliol de 2020

Codi: 20-002

© Fundació Antonio Gaudí. www.fundacionantoniogaudi.org

Aquesta obra està sota la llicència Creative Commons CC BY-NC 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Paraules clau: Gaudí, Arquitectura, Modernisme, Estructures, Barcelona, Catalunya

RESUM

Els arcs bessons de la façana del Palau Güell de Barcelona han estat classificats en la bibliografia sobre Gaudí com de perfil catenàric o parabòlic. Aquesta assignació es fonamenta en certa semblança que a primera vista tenen amb aquestes corbes. Recents estudis van demostrar que en realitat es tracta de corbes Rankine. El present escrit indaga sobre les raons funcionals, simbòliques i mecàniques sobre les quals s'hauria basat l'elecció d'aquesta forma de complicat traçat i analitza els procediments gràfics i altres mètodes als quals pot haver recorregut Gaudí per al projecte d'aquests arcs, amb fonament en els utilitzats en altres obres.

El perfil dels arcs de la façana del Palau Güell de Barcelona va ser un tema en general contemplat de forma superficial a la profusa bibliografia gaudiniana, en la qual la seva inusual forma va ser classificada gairebé sempre sense rigor científic. El mateix tractament van rebre altres formes utilitzades per l'arquitecte en les seves obres.

Amb referència als arcs usats per Gaudí i buscant claredat en l'assumpte vam realitzar fa alguns anys una investigació. Sobre la base de fotografies preses frontalment i mitjançant l'aplicació d'un procediment gràfic vam indagar en quines ocasions els arcs són paràboles o catenàries, i en quines no responen a cap dels dos perfils esmentats.¹

En el cas del tema d'aquest article, els portals del Palau Güell, els arcs encaixen en l'última categoria: no són parabòlics i tampoc no són catenàrics, el que no és una sorpresa, ja que la

simple inspecció visual revela que la seva forma s'allunya d'aquestes corbes.

La publicació el 2016 i 2017 de dos estudis a càrrec d'investigadors de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona va portar a consideració la qüestió.² Van consistir en el desenvolupament d'un mètode per a determinar amb precisió la forma d'un arc, la seva aplicació als arcs d'accés al Palau Güell, i la seva posterior utilització en la classificació dels 23 tipus d'arcs distribuïts en l'edifici.

Aquests treballs donen llum sobre l'assumpte, proveint eines d'alta precisió basades en tècniques d'escaneig de punts, models tridimensionals, procediments de geometria analítica, mètodes numèrics, informàtica i estadística, que permeten arribar a les conclusions més rigoroses. Segons els seus autors l'objecte va ser crear un protocol de determinació matemàtica destinat a trobar

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

equacions analítiques d'arcs amb aplicació a l'estudi del patrimoni arquitectònic.

Prenent com a primer cas específic els arcs de la façana del Palau Güell van deduir que el perfil que millor s'adapta a ells és la corba Rankine, amb un 99,75% de coincidència.³ La segona corba més ajustada a la forma dels arcs és l'el·lipse amb el 97,82%, molt més que la catenària i la paràbola, les dues corbes que recurrentment assenyalava la bibliografia.⁴ La comprovació és interessant perquè la corba Rankine requereix de complexes operacions matemàtiques per a la seva determinació.

PLANTEJAMENT DE LA QÜESTIÓ

El Palau Güell és un magnífic palau urbà que va encarnar el pas de Gaudí a la maduresa com a arquitecte, constituint una de les seves obres mestres malgrat ser encara molt jove a l'hora de projectar i construir-lo.

Les recurrents afirmacions que els arcs bessons de la façana principal del Palau Güell són de perfil catenàric o parabòlic segurament es basen en certa semblança que a primera vista presenten amb altres arcs que Gaudí va utilitzar en aquesta i altres obres, els que sí



Els arcs de la façana del Palau Güell (Foto Fundació Antonio Gaudí)

L'objecte del present escrit és esbossar una hipòtesi sobre el procediment que suposem podria haver seguit Gaudí per a l'ús d'aquesta figura difícil de dibuixar i poc usual, plantejament basat en els coneixements i mitjans de què disposava, i indagar en les motivacions que el van portar a la seva utilització.

responen als perfils esmentats encara que s'ha de dir que generalment són classificats amb certa lleugeresa.

Ningú va esmentar fins ara les corbes Rankine, segurament perquè no apareixen en els tractats de geometria elemental ja que a diferència de les altres les Rankine no en són

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

traçables amb els habituals mètodes geomètrics.

Qui els dona nom és William Rankine (1820-1872), enginyer i físic escocès que es compta entre els pioners de la termodinàmica. El seu treball professional el va portar a més a desenvolupar un mètode de traçat de corbes aplicable a les xarxes ferroviàries.⁵ També es coneix com "corba Rankine" a la que descriu el cicle de conversió de la calor en treball en el qu'és basa el procés de les centrals termoelectriques.

És autor de tractats de física aplicada que van abastar diverses branques d'aquesta ciència. Els seus nombrosos estudis van abastar a més el terreny de la construcció i especialment el de la mecànica aplicada.⁶ En un text que citarem més endavant Rankine va explicar les propietats dels arcs subjectes a càrregues verticals variables, als quals va anomenar "arcs estereostàtics".

Perquè Gaudí va voler dotar els arcs del palau Güell d'una forma bastant semblant a d'altres corbes de senzill traçat, com les còniques o la catenària, però que en canvi requereix de complexes operacions per a la seva delineació és assumpte a dilucidar. Igualment ho és la manca de correspondència d'aquesta corba amb la que dicta l'estat de càrregues de la façana, com veurem en el desenvolupament d'aquest escrit.

Val a dir que Gaudí sempre va estar obert a utilitzar tècniques alienes a l'arquitectura per a incorporar-les intel·ligentment. Per exemple quan va encarregar a un taller naval el doblegat dels perfils laminats que suporten la ondulada façana de la Casa Milà.⁷ O valer-se de forma inèdita de la fotografia com a eina de disseny per a l'església de la Colònia Güell.⁸

I pel que fa als recursos econòmics posats a la seva disposició per a la construcció d'aquest

palau, és sabut que van ser quantiosos, com ho reflecteix la coneguda anècdota que va involucrar al secretari d'Eusebi Güell.

El projecte i la construcció del Palau Güell va ser intens i ric en vicissituds. Es van fer diversos canvis sobre la marxa, afectant fins i tot els elements estructurals per afavorir la funcionalitat.⁹ És àmpliament coneguda la treballosa definició de la façana, que va requerir pel que sembla fins a 28 solucions diferents.¹⁰ Això no fa sinó deixar clar que la forma dels portals no va ser una cosa que va sorgir a l'atzar sinó com a fruit d'un procés en què van intervenir factors diversos: mecànics, constructius, funcionals i simbòlics.

Com àvid lector de Viollet-le-Duc Gaudí hi haurà pres nota del que el mestre recomanava en el seu "Dictionnaire" sobre abstenir-se de resoldre les qüestions d'equilibri per fórmules algebraïques que "són gairebé sempre inútils per al pràctic".¹¹

ALGUNS CONCEPTES GEOMÈTRICS I MECÀNICS SOBRE ARCS

Per al desenvolupament d'aquest estudi és convenient repassar alguns conceptes sobre el traçat i les propietats d'alguns perfils d'arcs. Geomètricament un arc és una corba contínua que uneix dos punts. En arquitectura el concepte assoleix una altra dimensió donada la seva condició d'element estructural. El perfil històricament més utilitzat per al traçat d'arcs va ser el circular, cosa que té explicació en la senzillesa de la seva construcció, encara que com sabem i després ampliarem no és en general la forma que dicta l'estàtica.

El cercle és part de la família de les còniques, figures qu'és poden traçar a partir de seccions planes d'un con. En el seu cas és una secció perpendicular a l'eix. La condició geomètrica fonamental del cercle és que tots els seus

Els arcs de la façana del Palau Güell.

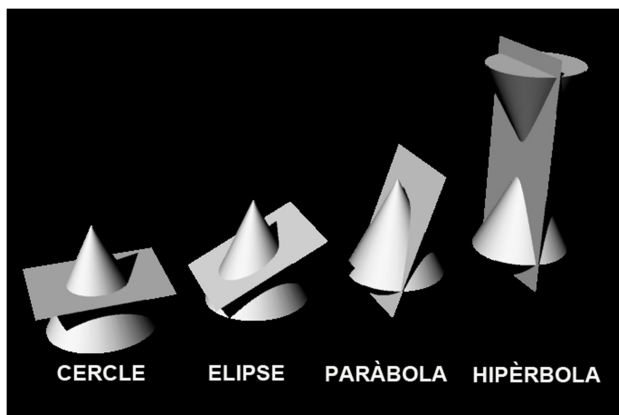
Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

punts són equidistants d'un centre o focus. Les el·lipses, altres corbes còniques, en són seccions planes en els infinits angles que van des de 90° fins a l'angle que forma la



Generació de les corbes còniques
generatriu del con amb el seu eix.

Compten amb dos focus amb els quals tots els punts de la corba guarden la següent relació: la suma de les seves distàncies a aquests focus és la mateixa. Es pot dir que un cercle és un cas extrem d'el·lipse en què tots dos focus estan conjugats.

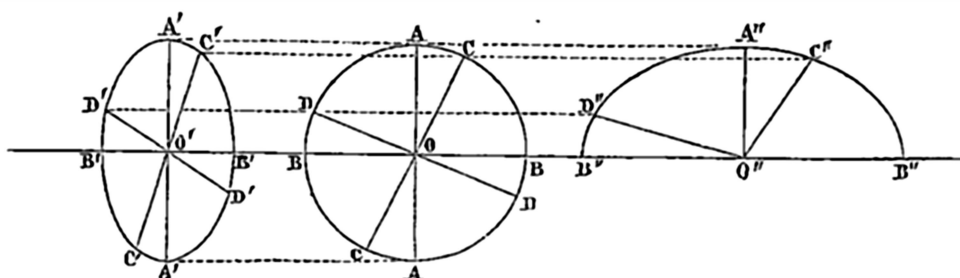
L'arc circular és la corba d'equilibri enfront de les pressions produïdes per un fluid uniforme. La pressió normal en cada punt de l'arc és equivalent a un parell de pressions conjugades de la mateixa intensitat en direccions perpendiculars, i la força tangencial en un punt de l'arc és el producte de la pressió normal multiplicada pel radi en aquest punt.¹² A l'ésser el radi igual en tots els punts la força al llarg de la corba és sempre la mateixa.

Si establim un sistema de coordenades ortogonal i totes les pressions en una de les direccions són multiplicades per un valor constant, les dues pressions en cada punt seran diferents entre elles, i l'arc destinat a suportar aquest sistema de pressions serà la projecció paral·lela d'un cercle, és a dir, una el·lipse, on el radi és variable i també ho són llavors les forces tangencials al llarg de la corba. L'esquema de pressions actuant ja no és el d'un fluid uniforme.

A mesura que una d'aquestes pressions es fa infinitament menor en comparació amb l'altra arribem finalment a l'altre cas extrem d'el·lipse: la paràbola, cònica traçada per un pla en l'angle que forma la generatriu del con amb el seu eix. Un dels seus focus està en l'espai finit mentre que l'altre està en l'infinít. Els punts de la paràbola equidisten del focus i d'una recta perpendicular a l'eix de la corba (recta impròpia) que anomenem directriu.

L'esquema de pressions actuant s'assembla ara a l'habitual en arquitectura, dictat essencialment per la força de gravetat materialitzada per la pressió paral·lela a l'eix de la corba, que en la disposició d'un arc és la component vertical. Així doncs, la paràbola és la forma equilibrada d'un arc sotmès a un estat de càrregues verticals repartides de manera uniforme en la projecció horitzontal.

Finalment entre les còniques tenim les hipèrboles, corbes de dues branques traçades per les seccions produïdes per plans en els infinits angles entre l'eix i la generatriu d'un con doble.



Cercle i el·lipse. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 201

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

LA CATENÀRIA

Una altra figura recurrent en la bibliografia gaudiniana, la catenària, és la inversió de la corba formada pel pes propi d'una corda penjada de dos punts. Un arc de directriu catenàric respon a un estat d'equilibri de forces verticals creixents en la projecció horitzontal des de la clau cap als suports. Això succeeix per haver de suportar cada punt de l'arc un pes idèntic. A mesura que ens allunyem de la clau cada tram successiu de la projecció horitzontal suporta més pes perquè inclou més punts de la corba. Aquest augment ha de respondre a uns valors precisos per formar una catenària, els que poden ser calculats de manera analítica i gràfica. Una manera senzilla de fer-ho és mitjançant el traçat d'una recta horitzontal en la clau i mesurant a intervals regulars unes distàncies específiques des d'aquesta línia que determinen cada punt de la corba.

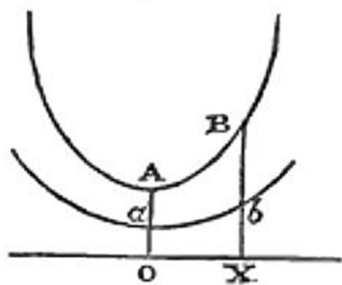


Fig. 113.

La catenària i la catenària transformada. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). P. 201

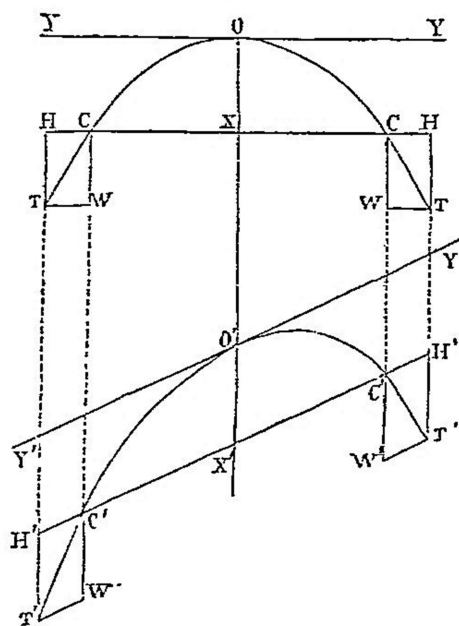
William Rankine, qui dóna nom a la corba que adopten els arcs de la façana de Palau Güell, esmenta en els seus tractats la figura que anomena "catenària transformada", corba que es dibuixa a partir d'una catenària preservant les coordenades horitzontals des de l'eix, però alterant les verticals en un determinat percentatge. La figura resultant és una altra catenària dibuixada en diferent

escala on la càrrega en cada tram d'arc és proporcional a l'àrea compresa entre aquesta secció d'arc i la horitzontal de referència ("extradós" l'anomenarà, com veurem), i la intensitat en cada punt és proporcional a l'ordenada d'aquest punt, dues propietats de la catenària.

L'ARC ESTEREOSTÀTIC

És poc freqüent l'estat de càrregues capaç de definir una corba de pressions ajustada a una figura regular de fàcil traçat (cercle, el·lipse, cònica o catenària). En general incideixen pesos que l'aparten d'aquests traçats.

Fig. 91.



L'arc estereostàtic. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 219

Determinats índexs de variació de les forces vertical i horitzontal sobre un arc generen corbes específiques: Arribem aquí a un particular tipus d'arc qu'el científic escocès descriu en la seva bibliografia: l'arc estereostàtic.¹³

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

Es tracta d'arcs lineals destinats a suportar una pressió vertical V , creixent des de la clau fins als suports, i una altra pressió horitzontal H (que pot ser inclinada), constant, situades en un mateix pla. Una condició qu'estableix Rankine és que les càrregues verticals han d'estar distribuïdes de forma simètrica respecte de l'eix que passa per la clau de l'arc. Un perfil d'aquest tipus és el que descriuen els arcs dels portals de Palau Güell.

La determinació matemàtica d'un arc estereostàtic respon a cosinus hiperbòlics en combinació amb funcions exponencials i requereix d'operacions matemàtiques que resulten molt complicades per a les necessitats dels arquitectes. No obstant això aquests arcs poden ser traçats sobre la base d'un model penjant situant pesos creixents des de la clau cap als suports representant les càrregues actuant en cada tram.

ARC LINIAL SOTA
CÀRREGA VERTICAL

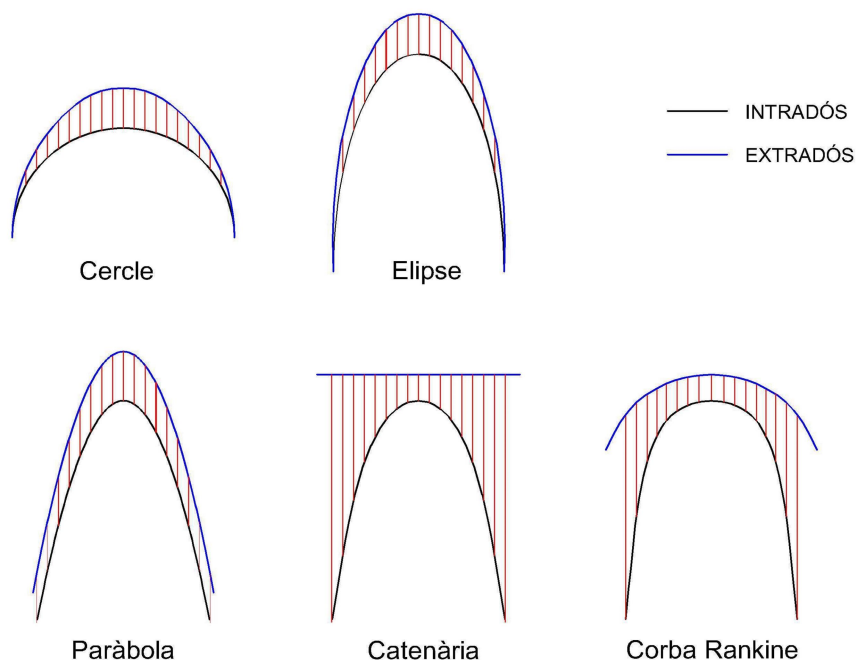
Per a l'estudi del comportament mecànic dels arcs citem novament a Rankine, qui va definir els "arcs linials" com aquells formats per una corda invertida i rigiditzada capaç de preservar la seva forma i resistir una compressió representant així un arc equilibrat sota les forces que actuen sobre ell.¹⁴

Un cas particular d'aquest tipus de corbes és la catenària. Ja hem dit que es pot traçar mesurant determinades distàncies des de punts específics

d'una horitzontal normal a l'eix. Per això l'extradós d'una catenària és una línia recta perpendicular a l'eix. Pel mateix és l'arc que millor s'adapta a un esquema constructiu amb eixutes massisses i poca càrrega superior.

Rankine va anomenar *intradós* a la figura del propi arc, i *extradós* a la línia que uneix els extrems superiors de les verticals dibuixades cap amunt des de l'intradós amb longituds que representen les intensitats de les càrregues. Les corbes que hem descrit més amunt posseeixen certes característiques en relació amb aquestes definicions.

Així, el·lipses i cercles, corbes tancades que equilibren pressions normals iguals en tot el seu desenvolupament, si estan sotmeses a forces només verticals com la gravetat s'adapten a la pressió normal vertical a la clau mentre que en els punts en què les corbes són tallades per el seu eix horitzontal mantenen



Intradós i extradós segons la definició de Rankine

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

l'equilibri si la component vertical és zero, mentre que l'horitzontal és màxima, igual a la pressió normal. L'extradós és així una corba allargada en direcció vertical. Un estat de càrregues semblant, decreixent des de la clau cap als suports, és infreqüent.

La paràbola, com corba oberta (es tanca a l'infinit) és com vam dir la corba que equilibra càrregues verticals uniformement repartides. Per tal qu'el pes de les eixutes no afecti aquest esquema ha d'haver una càrrega considerable provinent de l'estructura superior. L'extradós és una altra paràbola desplaçada verticalment.

Quan la distribució de les càrregues és tal que les seves intensitats són creixents en forma simètrica des de la clau en projecció horitzontal les corbes d'equilibri són les estereostàtiques, o "corbes Rankine".

Un cas particular d'aquest tipus de corbes és la catenària. Ja hem dit que es pot traçar mesurant determinades distàncies des de punts específics d'una horitzontal normal a l'eix.¹⁵ Per això l'extradós d'una catenària és una línia recta perpendicular a l'eix. Per la mateixa raó és l'arc que millor s'adapta a un esquema constructiu amb eixutes massisses que afecten la càrrega superior.

L'ESTAT DE LA QÜESTIÓ SOBRE EL CÀLCUL ESTÀTIC D'ARCS EN TEMPS DE LA CONSTRUCCIÓ DEL PALAU GÜELL

En algun moment de la història la llinda suportat per dos elements verticals va ser reemplaçat per dos elements lineals inclinats recolzats mútuament exercint forces oposades.

D'allí a la idea primordial de l'arc hi va haver només un pas: L'agregat un tercer element intermedi, la clau. Allà va començar l'acció del fregament i les forces interactuants entre ells

com a responsables de l'equilibri. L'arc adovellat és l'evolució d'aquesta idea primària, encara que els seus fonaments essencials van continuar sent els mateixos.

Per qu'els esforços generats en la estructura no afectin l'estabilitat s'han de complir determinades condicions geomètriques en la relació entre la fletxa i la llum de l'arc. L'ús d'un determinat perfil no garanteix l'estabilitat. El problema va ser històricament resolt amb l'addició de càrregues per verticalitzar les resultants. Si no hi ha empentes significatius n'hi va haver prou amb el pes dels carcanyols. Les voltes van ser dotades de contraforts l'evolució dels quals van ser els arcbotants. Igual va passar amb els arcs faixons i les voltes de creueria. Tot això fins al segle XIX es va fer amb base en l'experiència i la intuïció, sense fonament tècnic algun.

Al llarg d'aquest segle va evolucionar el concepte de "corba de pressions". Els mètodes de "Estàtica gràfica" tan populars en temps en què Gaudí estudiava a l'Escola d'Arquitectura de Barcelona, van permetre als arquitectes comptar amb una eina senzilla per dissenyar estructures. Els arcs adovellats, elements essencials de la construcció i components de gran protagonisme en l'arquitectura del segle XIX, requerien en aquells dies, abans de la irrupció del formigó armat, que les seves peces resistents continguessin a la corba de pressions.

Henry Moseley va enunciar al voltant de 1843 que la teoria de l'equilibri d'una estructura queda establerta per la línia que determina el punt d'aplicació de la resultant de les pressions sobre les superfícies de contacte ("línia de resistència") i per la línia que defineix la direcció d'aquesta resultant ("línia de pressions").¹⁶ Queden satisfetes les condicions d'equilibri del sistema quan

Els arcs de la façana del Palau Güell.

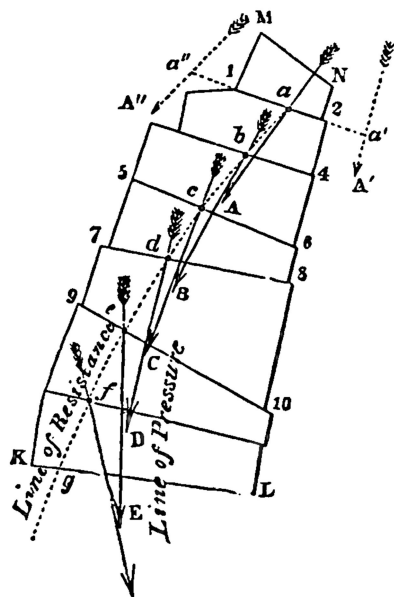
Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

aquestes línies no excedeixen els límits de l'arc i quan la segona no incideix en les juntes en un angle més gran que l'angle límit de resistència.¹⁷

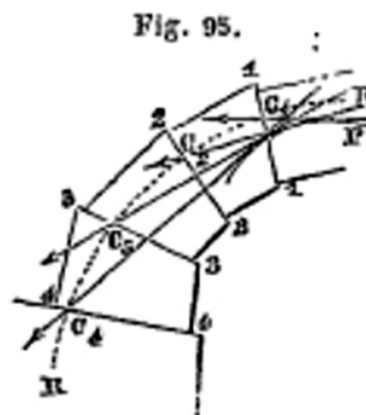


Línia de resistència i línia de pressions. De MOSELEY, HENRY. (1843). P. 380

William Rankine, va explicar que la corba de pressions (anomenada també "corba d'equilibri"), la corba inscrita al polígon format per les línies que passen per tots els centres de resistència (centres de pressió en les juntes), com a aplicació dels "arcs lineals".¹⁸

La va definir a més com la successió de tangents a una poligonal amb peces i unions tan nombroses que la seva figura pot ser considerada com una corba contínua que constitueix la corba d'equilibri requerida.¹⁹ Recollint conclusions de contemporanis Rankine va afirmar que l'estabilitat d'un arc és segura si un arc lineal, balancejat sota les forces que actuen en l'arc real, pot ser

dibuixat en el terç central de les juntes.²⁰ Una condició essencial és que totes les forces que mantenen l'equilibri de l'arc han de ser pressions actuant de fora cap a dintre.²¹



La Corba de pressions. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876). P. 256

Per al traçat de la corba de pressions van ser desenvolupats nombrosos mètodes que en general van consistir en establir dos punts de pas de la corba en cada semiarc: en la clau, el punt d'aplicació de l'empenta horitzontal, i el "punt de ruptura", a l'intradós, situat en un angle de 60° respecte a l'eix de l'arc, que és el punt en què la corba de pressions es troba amb l'intradós.²² Per aquest últim passa la resultant de la porció d'arc compresa, amb direcció tangent a la corba.

La bibliografia va deixar establert que d'entre totes les línies possibles la que passa pel límit superior del terç mitjà en la clau, i per la vora interna del terç mitjà a la junta de ruptura és la que exerceix menor empenta. Els diversos mètodes van adoptar aquesta regla pràctica. D'aquesta manera es podia compondre un triangle que serviria de base per traçar el polígon de pressions amb la sumatòria de les càrregues verticals de cada secció de l'arc formant el tercer costat que representa el pes

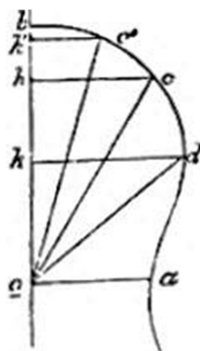
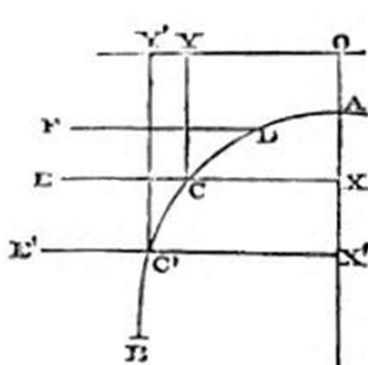
Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



Mètode per determinar les pressions qu'estableixen l'equilibri. De RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). P. 213

de tota la porció considerada aplicat en el seu centre de gravetat.

Rankine explica el fonament de l'mètode: en un esquema de càrregues verticals distribuïdes de qualsevol manera és possible determinar un sistema de pressions conjugades que estableixin l'equilibri. Poden ser resoltes gràficament construint un polígon auxiliar al què es traslladen la tangent en un punt determinat (C) que representa la compressió al llarg de l'arc i la suma de les càrregues suportades per l'arc AC (Oh). Tanca el triangle el segment hc que representa la component horitzontal.

En resu, etemps de Gaudí se sabia que l'estabilitat de l'arc quedava garantida si la corba de pressions estava continguda en el propi arc, quan la seva incidència en cada junta era propera a la perpendicular i si les empentes en cada punt de l'arc i en els seus suports (la component horitzontal de la resultant) podien ser absorbits per alguna part de la construcció, sigui el mateix arc o algun element supletori.

ELS ARCS GAUDINIANS

L'interès de Gaudí pels arcs equilibrats deixant de banda prejudicis estètics es va manifestar

des de les seves primeres obres.²³

Ja abans de projectar el Palau Güell havia experimentat amb l'arc catenàric a la Finca Güell i en la desapareguda cascada-mirador de la Casa Vicens.²⁴ Aquesta tècnica evolucionarà fins a arribar al desenvolupament de voltes amb forma de superfícies reglades guerxes en diverses obres. Contemporàneament al Palau Güell va utilitzar arcs parabòlics de maó al Col·legi Teresià.

És sabut el seu coneixement dels mètodes gràfics de disseny estructural i dels diferents perfils d'arcs ajustats als estats de càrregues. Gaudí es valia dels mètodes gràfics tan en ús a finals del segle XIX, els que atorgaven fiabilitat. En aquest sentit es trobava immers en l'esperit de l'època que



Arcs de les cavallerisses de la Finca Güell
(Foto Fundación Antonio Gaudí)

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

pretenia conèixer un estat possible d'equilibri d'una estructura.²⁵ D'això va deixar constància en els seus escrits de joventut.²⁶ El mètode gràfic en una versió simplificada pel mateix Gaudí va ser la seva eina per a la determinació de l'estabilitat d'elements bidimensionals.²⁷

En nombrosos casos els arcs s'ajusten a la corba de pressions així obtinguda, prioritzant l'eficiència mecànica per sobre els preconceptes estètics. En això es diferenciava de la generalitat dels seus col·legues qui usaven aquest mètode per verificar que la forma prèviament establerta complís amb les condicions d'equilibri assegurant-se que aquesta corba estigués continguda en la figura dissenyada.

A més dels mètodes gràfics Gaudí es va valer dels models penjants com a eina de disseny. Encara que no existeix documentació sobre la materialització d'aquest tipus de maquetes fins a almenys els seus primers estudis per a una capella no construïda al Park Güell, al voltant de 1900, és vàlid suposar que pogués haver-les utilitzat amb anterioritat, segurament no amb la complexitat que va desenvolupar en aquest projecte tridimensional i molt menys en el posterior projecte de l'església de la Colònia Güell, però si és versemblant que ho hagi fet en estudis en dues dimensions.

Una mica més tard, aproximadament el 1908, per a la construcció dels arcs de l'àtic de la Casa Milà va traçar a partir de cordes penjades formant catenàries a les que aplicava pesos a escala que materialitzaven la influència de les eixutes i taulers, com ho manifesten les fotografies de l'obra.²⁸

Donats els coneixements i experiències que ja atresorava en la seva joventut, podria haver utilitzat aquesta tècnica en el traçat dels arcs de la façana del Palau Güell, procediment que

havia de conèixer a través dels llibres que gràcies als seus biògrafs sabem consultava assíduament, on es reflectien alguns experiments en aquest camp que es venien desenvolupant des de dos segles enrere. Un dels textos que Gaudí segurament va consultar en les seves lectures a la biblioteca de l'Escola d'Arquitectura va ser el tractat de Jean-Baptiste Rondelet.²⁹

Gaudí va utilitzar aquests mètodes sabedor que les imprecisions que poden comportar són poc significatives en l'àmbit de la construcció. D'allí procedia a elaborar les plantilles que serien traslladades a la pedra o el maó.

LA DEFINICIÓ DE LA FORMA DELS ARCS DE LA FAÇANA DEL PALAU GÜELL

Com ja es va dir els arcs de la façana del Palau Güell s'ajusten a una corba Rankine amb un 99,75% de coincidència i a una el·lipse amb el 97,82%. Seria atractiu suposar sobre la base de la diferència aparentment petita entre ambdues un intent per part de Gaudí de traçar una el·lipse amb un senzill mètode geomètric en lloc de la complexa corba Rankine. Aquesta dissimilitud d'1,93% representa però en la pràctica un valor considerable tot i acceptar que tota construcció té marges de tolerància: Per als 5,90 m. d'alçada dels arcs la discrepància és de mitjana de 11,4 cm. i arriba al voltant de 16 cm. en alguns punts segons el mostra el dibuix que acompanya l'estudi de Samper, González i Herrera. Allà es pot veure com l'el·lipse s'allunya cap amunt a la clau mentre que a la resta de l'arc s'entrecrua amb la corba Rankine.

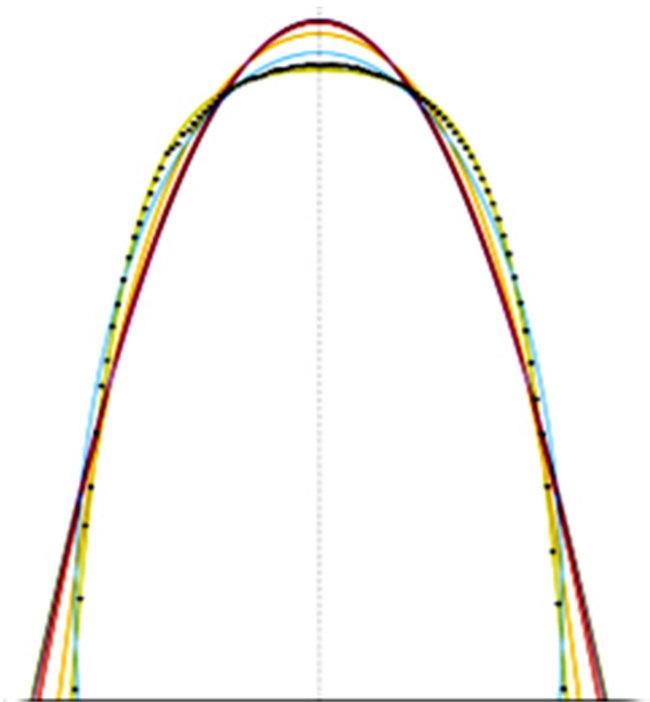
Es pot comprovar gràficament qu'els arcs que mostra la façana de el projecte signat el 30 de juny de 1886 tenen la mateixa directriu qu'els finalment construïts, malgrat existir alguns

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



Comparació entre corba Rankine, el·lipse, paràbola, catenària, hipèrbola i cosinus hiperbòlic aplicada als arcs de la façana del Palau Güell. De SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2016)

canvis com l'absència de les dues tribunes de la segona planta o la forma del coronament. Aquest plànol va ser dibuixat en escala 1:50, la qual cosa suposaria errors de més de 3 mil·límetres per un arc d'uns 12 centímetres d'alçada. A més, d'haver-se pretès dibuixar una el·lipse és molt probable que s'hagués utilitzat el conegut mètode del cordill fixat en els dos focus, que no deixa marge a l'error.

Des de la nostra perspectiva són poc probables imprescions d'aquesta magnitud per a algú com Gaudí, detallista i involucrat fins al detall en cada aspecte de les seves obres.

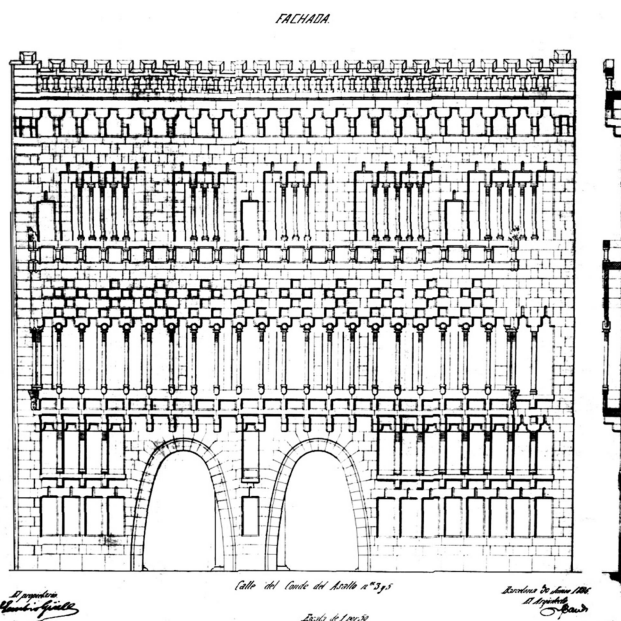
De tot el que s'ha exposat fins ara poden ser remarcats com dades objectives els següents:

1r) Els arcs de la façana del Palau Güell tenen una directriu molt ajustada a un arc Rankine, dada que sorgeix dels estudis esmentats al començament que deixen establerta la qüestió amb fonament científic. Les corbes Rankine són figures de molt complicat traçat que requereixen càlculs matemàtics complexos.

2n) Els mètodes gràfics eren d'ús habitual entre els arquitectes com a mitjà de verificar l'estabilitat d'una estructura, tal com es va explicar més amunt i no repetirem per no sobreabundar.

3r) L'ús de models penjants com a eina de projecte estava documentat a través de diversa bibliografia en temps de Gaudí.

Sobre la base d'aquests coneixements s'intentarà una hipòtesi sobre la forma en què van ser projectats els arcs de la façana del Palau Güell, els factors que van intervenir i les motivacions que van definir la seva directriu.



Façana del project signada el 30 de juny de 1886

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

El procés s'iniciarà amb un estudi de la corba de pressions que sorgeix de l'anàlisi de les càrregues que actuen a la façana de l'edifici segons el mètode que està documentat que utilitzava Gaudí.

Amb aquest procediment gràfic es verificarà l'adequació a la directriu de l'arc i l'estabilitat d'aquest element.

S'estudiarà la possibilitat de l'ús d'una maqueta penjant carregada amb els mateixos pesos.

Es compararà la forma de l'arc finalment adoptat per Gaudí amb l'opció alternativa de disseny d'aquests arcs que coneixem gràcies al fet que va ser publicada abans de la destrucció de l'arxiu de Gaudí.³⁰

Finalment es farà un intent de determinació geomètrica de la forma dels arcs basada en mètodes gràfics, i s'esbossarà conclusions a partir de les anàlisis desenvolupats i els resultats obtinguts al llarg de l'estudi.

TRAÇAT DE LA CORBA DE PRESSIONS AMB EL MÈTODE GRÀFIC

A continuació s'efectuarà l'aplicació als arcs de la façana del Palau Güell del mètode gràfic que utilitzava Gaudí per al traçat de la corba de pressions, consistent en la divisió de l'arc en seccions verticals, determinació de la direcció de la resultant en el punt de ruptura, dibuix del triangle de forces i composició de les forces sobre l'arc.³¹

En primer lloc es determinaran les càrregues que hi intervenen. Per a això es prendrà com a base els plànols i estudis duts endavant pels professionals que van intervenir en treballs de restauració de l'edifici.

FAÇANA

Es tracta d'una façana portant de pedra calcària de Garraf provinent de les pedreres

qu'Eusebi Güell posseïa en aquesta comarca al sud de Barcelona, d'aproximadament 70 cm. de gruix, encara que variable en el seu desenvolupament vertical a causa de la presència de nombroses obertures. Aquestes es situen en un esquema asimètric. Contra els cànons acadèmics els portals de Planta Baixa no estan situats al centre, tot i que componen amb altres elements distribuïts en les plantes superiors un esquema de simetria axial amb els arcs com a protagonistes. Les diferències entre la façana del projecte i la construïda no tenen incidència en aquesta anàlisi ja que les càrregues són pràcticament les mateixes.

ANÀLISI DE CÀRREGUES:

Les càrregues provenen de la coberta, la planta sota coberta, la planta segona i la planta noble al llarg dels 23,50 metres d'ample de la façana. Aquí Gaudí va situar una gran tribuna on una successió de columnetes en dues fileres desfasades regularitza la distribució de les càrregues al llarg de tot el parament per sobre les claus dels arcs.

Sobre la Planta Baixa hi ha un entresòl perforat pels carrers d'accés i sortida de carruatges (l'altura d'aquests carrers arriba als 6,50 metres), part del qual és sostingut per jàsseres perpendiculars al pla de la façana que descarreguen en el mur a 3,80 i 4,30 metres d'alçada. Quatre d'aquestes jàsseres influeixen directament sobre els arcs de manera que s'analitzarà més endavant.

Els 4 forjats que incideixen en la façana principal són, de dalt a baix:

COBERTA:

Segons la descripció que dels restauradors del Palau Güell basant-se en cales realitzades, el sistema constructiu del forjat de la coberta és el següent:

Bigues metàl·liques i forjat de revoltó ceràmic, amb els carcanyols farcits de reble de rajola i

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

morter de calç sobre els quals s'estén un tauler format per quatre fulles de rajola comuna de 29 x 14 x 2 cm., La primera a trencajunts presa amb guix, les dues fulles de sobre en diagonal preses en espiga i enrajolat de aparellat en espiga.³²

PLANTA SOTA COBERTA:

El forjat de la planta sota coberta, on se situaven les habitacions de servei, és una estructura de fusta formada per bigues de gran cantell de 40 x 30 cm. en una direcció, i en l'altra de 30 x 30 cm, girades 45 graus sobre la qual recolza una solera de diverses capes de morter i peces ceràmiques amb un gruix de 15 cm.³³ Aquesta configuració respon a la necessitat d'obtenir el màxim aïllament acústic, com ho va demostrar un estudi realitzat a aquest efecte.³⁴

PLANTA SEGONA:

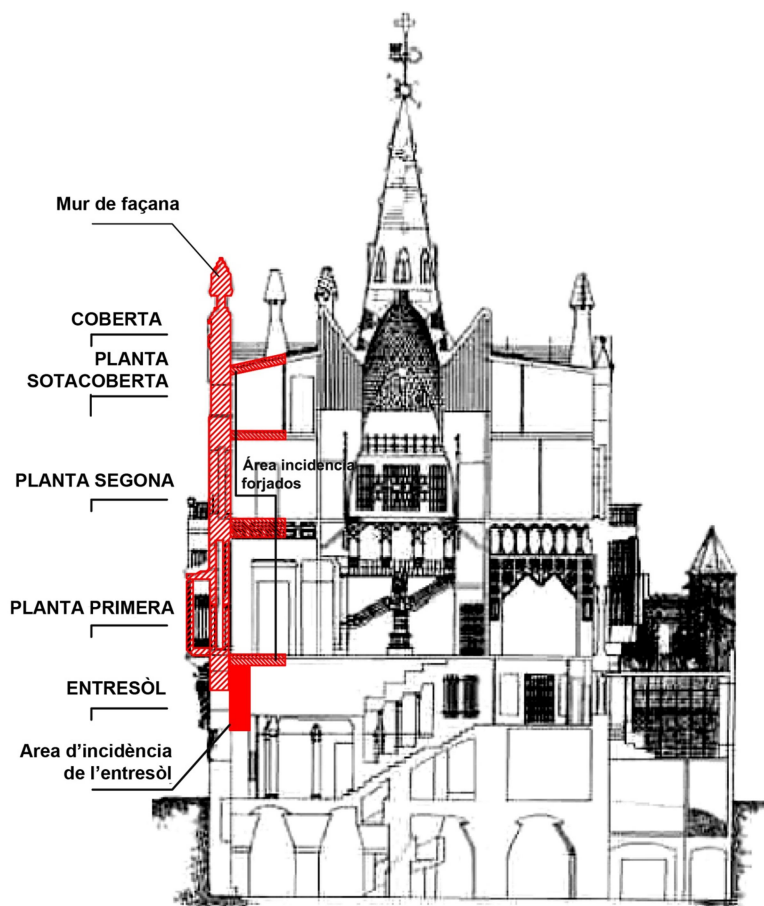
El forjat de la planta segona és una original estructura portant de fusta que reuneix la funció sustentant amb la formal ja que queda vista com a sostre dels salons de la planta primera a manera de enteixinat.

PLANTA PRIMERA:

El forjat de la planta primera es compon de bigues de perfils metàl·lics, com el descriuen els restauradors.

ENTRESÒL

Com es va dir més amunt, altres 4 jàsseres que reben les càrregues de l'entresòl es recolzen en aquesta façana a la zona dels arcs d'ingrés. Degut a raons funcionals aquestes jàsseres descarreguen a diferent altura: a 4,30 metres les centrals i a 3,80 les laterals, situant-se els seus eixos a una distància d'1,65



Secció transversal amb estudi de les càrregues que incideixen sobre els arcs

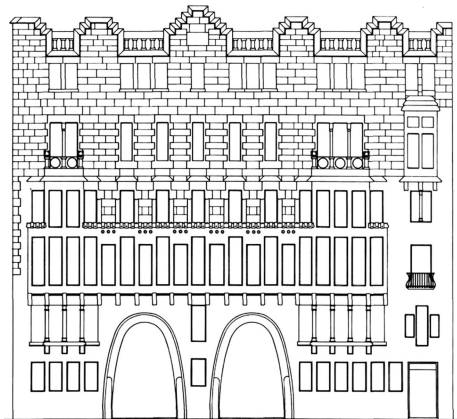
Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



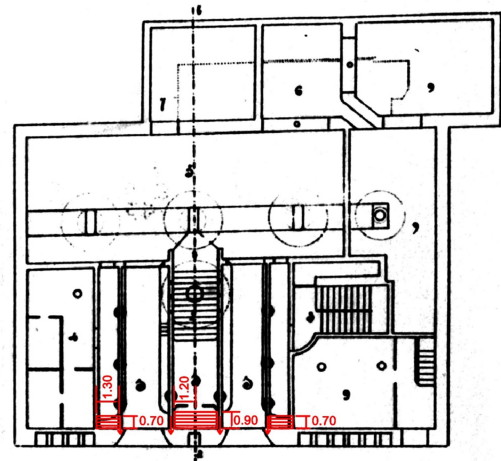
Fundació Antonio Gaudí®

FAÇANA ACTUAL

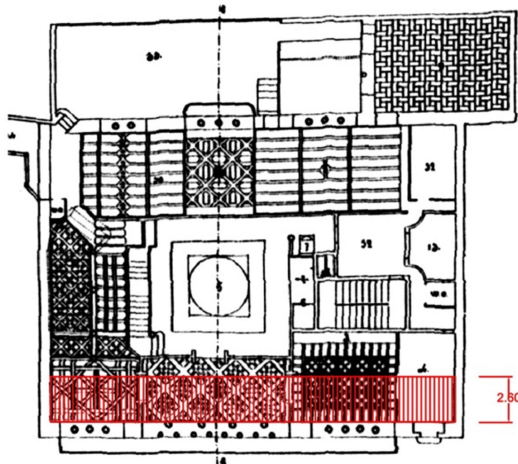


PLANTA COBERTA
PLANTA SOTA COBERTA
PLANTA SEGONA
PLANTA PRIMERA
PLANTA ENTRESÒL

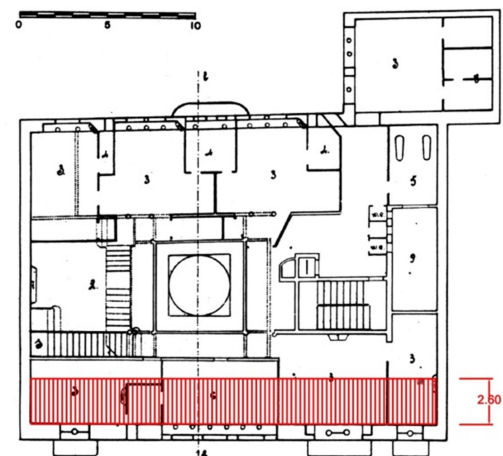
CÀRREGUES ENTRESÒL



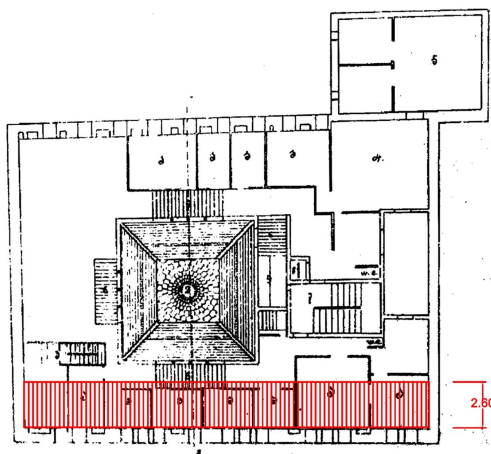
CÀRREGUES PLANTA PRIMERA



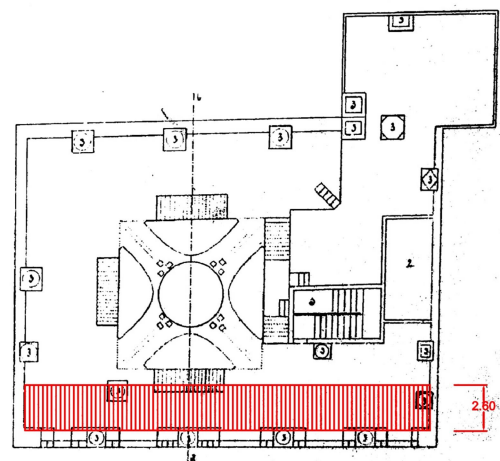
CÀRREGUES PLANTA SEGONA



CÀRREGUES PLANTA SOTA COBERTA



CÀRREGUES COBERTA



Façana i Plantes amb estudi de les càrregues que incideixen sobre els arcs

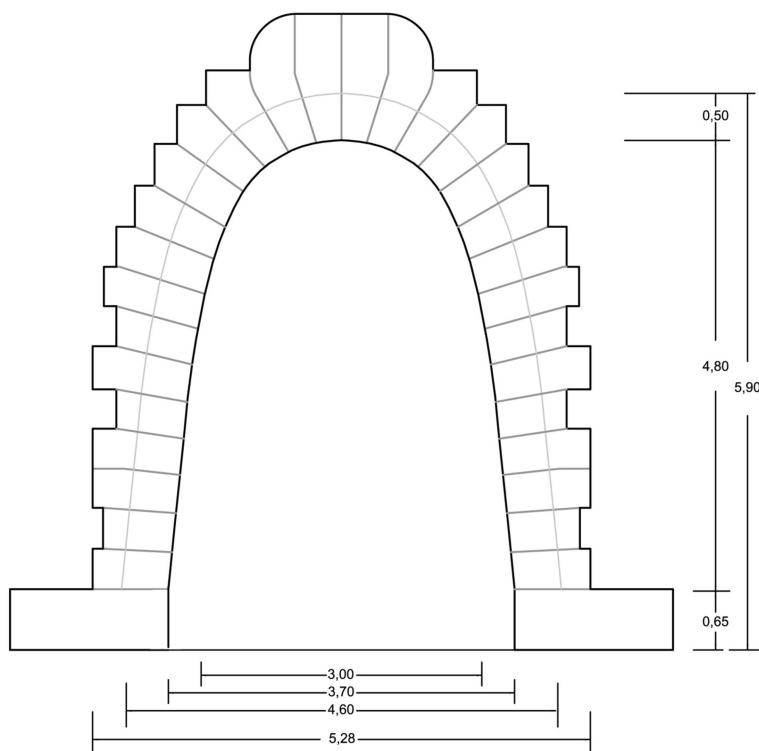
Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



Arc de la façana del Palau Güell. Dovellat i mides

TRAÇAT DE LA CORBA DE PRESSIONS

Per a efectuar el traçat de la corba de pressions seguint el mètode que utilitzava Gaudí van ser aplicades en una meitat de l'arc les càrregues calculades repartides en trams de llarg uniforme (12 trams de 0,20 m.). El punt de ruptura es va situar a la junta a un angle de 60º des de l'eix i l'empenta horitzontal en la clau es va situar en el límit exterior del terç central.

Un cop compostes les forces els resultats van ser els següents:

La corba en principi havia de ser en el seu primer tram prop de la clau bastant semblant a una paràbola com a conseqüència que les càrregues són molt similars en aquests trams. No obstant això resulta marcadament modificada

per la influència de les càrregues puntuals de les jàsseres de l'entresòl que incideixen en el tram 8 i alteren aquesta corba que es deforma cap a dins.

Actua també en aquest sentit l'augment progressiu de la càrrega en cada tram com a producte de la pròpia geometria de l'arc.

L'equilibri està assegurat ja que la corba de pressions està continguda en la seva totalitat dins de l'arc entre la clau i el punt de ruptura. En aquest tram de l'arc el recorregut és el recomanat per la bibliografia: pel límit interior del terç central.

A mesura qu'ens aproximem als suports la resultant tendeix a allunyar-se del terç central. Això no suposa perill per a l'estabilitat

m. a banda i banda dels eixos dels arcs. Els arcs formen les portes d'accés i sortida i tenen una conformació que combina la funcionalitat i l'estàtica. Queda inscrit en cada un d'ells un va per al pas de carruatges amb una alçada de 3,60 m. i una amplada de 3,00 m. La forma dels arcs va haver d'adaptar-se a aquest requeriment funcional. A partir d'aquesta informació es va efectuar l'anàlisi de càrregues que s'adjunta en l'Annex I, del qual van sorgir els següents resultats:

TOTAL CÀRREGA REPARTIDA DEL MUR A NIVELL BAIX FORJAT PLANTA BAIXA (Sostres + mur façana):
22.460 kg/ml.

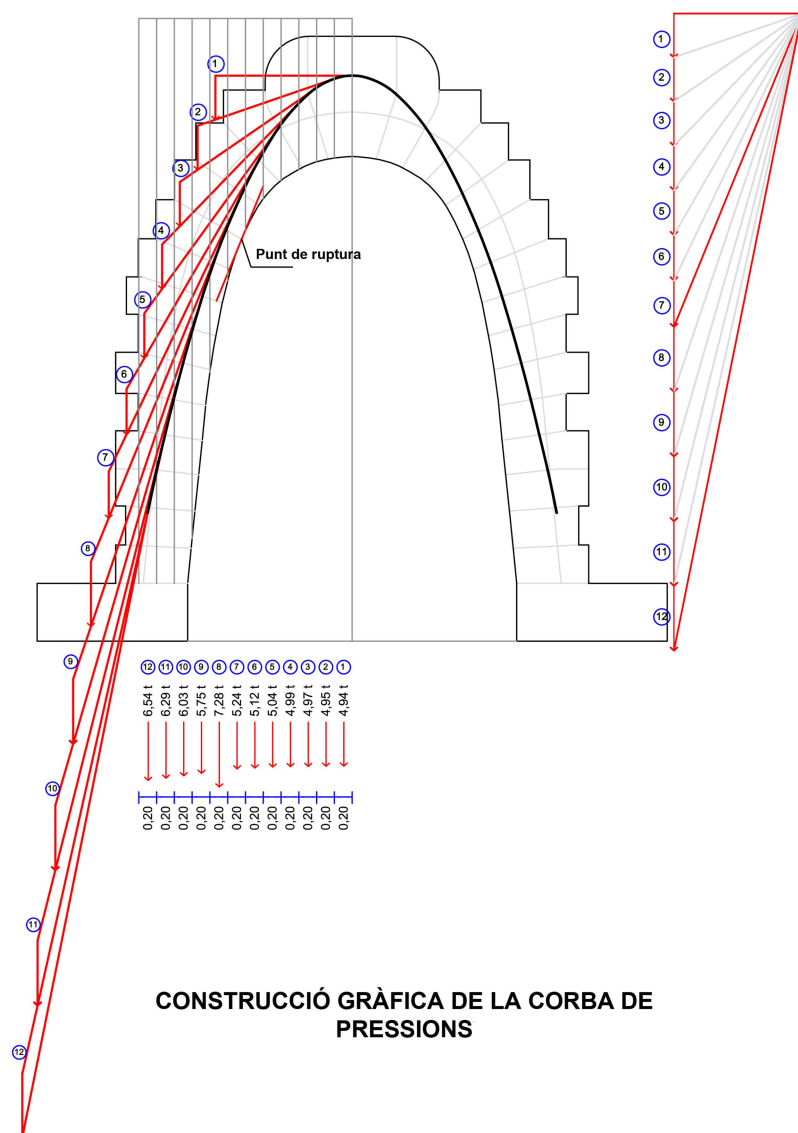
CÀRREGAS PUNTUALS ENTRESÒL:
Jàsseres laterals: 1.675 kg.
Jàsseres centrals: 1.867 kg.

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



CONSTRUCCIÓ GRÀFICA DE LA CORBA DE PRESSIONS

Construcció gràfica de la corba de pressions amb el mètode que utilitzava Gaudí

ja que en aquesta zona l'arc es confon amb el mur a través de les traves de les dovelles. La càrrega vertical i el propi mur contraresten les empentes i tot el conjunt resulta equilibrat. Com a conclusió evident s'observa que la corba de pressions no s'assembla a la forma de l'intradós de l'arc.

Aquesta manca de correspondència si bé no suposa conseqüències per a l'estabilitat de l'estructura resulta notable tenint en compte

l'ús que generalment Gaudí feia dels arcs no convencionals en arquitectura, ajustats als dictats de l'estabilitat.

En aquest cas semblen prevaler una altra classe de motivacions, que passen més per qüestions funcionals, formals i representatives que s'analitzaran més endavant.

Un tema a destacar és el dovellat dissenyat per Gaudí per als arcs. En són destacables les enormes peces a la zona de la clau, d'1,35 metres d'altura, amb la funció és la d'elevat el centre de gravetat on s'aplica la càrrega.

És interessant també el fet que la clau està de manera poc usual dividida en dues peces fent coincidir una junta amb l'eix de l'arc. És també notable la forma de les dovelles de la clau amb perfil arrodonit generant una lligam amb els carreus del mur.

Finalment cal prestar atenció als trams verticals que eleven l'arrencada dels arcs en 0,65 m. sobre el nivell del sòl, cosa no repetida per Gaudí en altres obres on els arcs arrenquen inclinats des del terra. Totes aquestes observacions no fan sinó afegir més interès a la formulació d'hipòtesis sobre les possibles causes que van influir en el traçat dels arcs.

PROBABILITAT D'UTILITZACIÓ D'UN MODEL PENJANT

La possibilitat que Gaudí s'hagi valgut d'una maqueta penjant per al traçat dels arcs de la façana del Palau Güell va ser avaluada mitjançant un experiment amb un model al

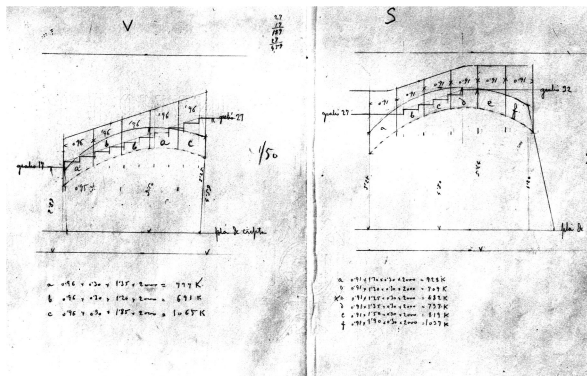
Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



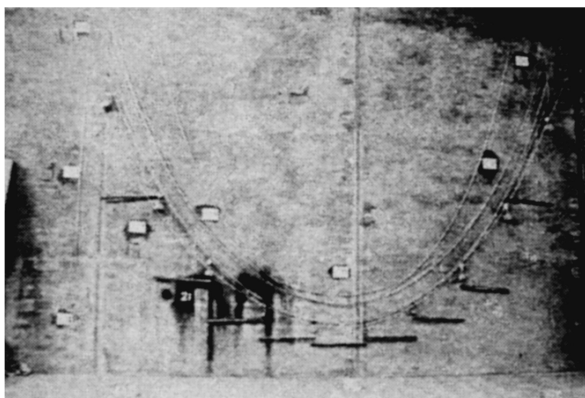
Fundació Antonio Gaudí®

què van ser incorporats pesos en escala representant les càrregues calculades per als punts de l'arc.



Full de càlcul per al model penjant de l'església de Colònia Güell

Es va reproduir el mètode que està documentat que el mateix Gaudí va utilitzar en el projecte de l'església de la Colònia Güell: estudi de les càrregues, trasllat a escala dels pesos a la maqueta penjant i verificació de la forma obtinguda mitjançant fotografies. Així ho demostren alguns documents conservats tot i que cal assenyalar que en aquell cas es va tractar d'un complex sistema tridimensional.



Fotografia presa pel constructor Josep Bayó d'un dels models penjants per a la determinació de la forma dels arcs de l'àtic de la Casa Milà

Per als arcs de l'àtic de la Casa Milà Gaudí va utilitzar el mateix mètode. Tot i que el relat del constructor Josep Bayó refereix solament cadenes penjants, sense pesos afegits, la



Fotografia de la maqueta d'estudi carregada amb els pesos de cada tram a escala

fotografia conservada deixa veure el que semblen ser petits sacs que contindrien pesos. El resultat d'aquest experiment va ser que la maqueta penjant que sorgeix segons l'esquema de càrregues que incideix sobre l'arc no adopta el perfil d'aquest sinó un de molt semblant a l'obtingut mitjançant el mètode gràfic.

EL PROJECTE ALTERNATIU REBOTJAT

Ja s'ha dit que a través del llibre del seu biògraf Josep F. Ràfols coneixem el dibuix d'un dels 28 estudis de façana realitzats per Gaudí per al Palau Güell. Una anàlisi d'aquest pla feliçment conservat aporta algunes dades d'interès per a aquest estudi.

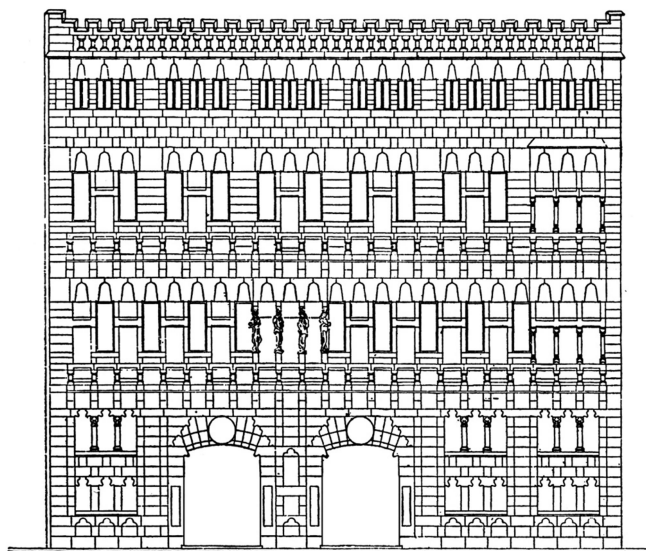
Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

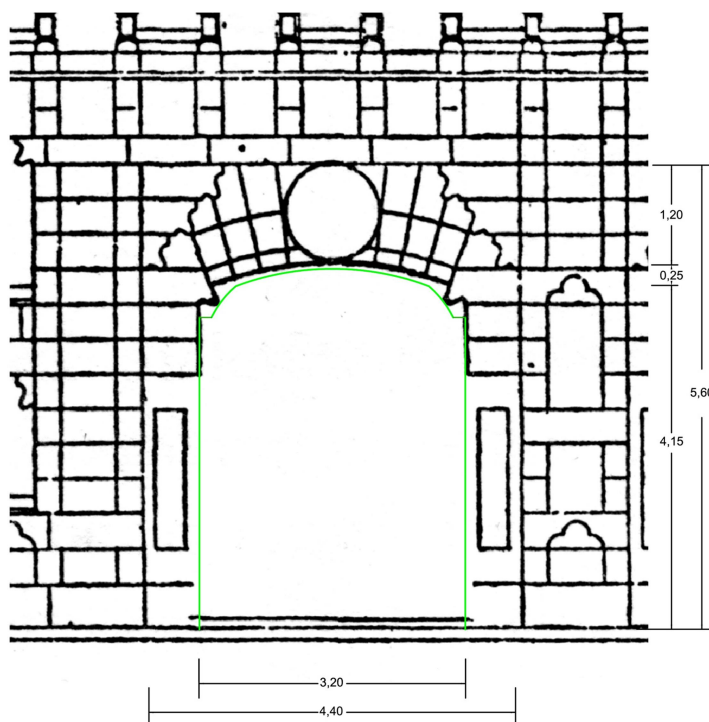
Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



Projecte alternatiu de façana rebutjat publicat en RÀFOLS



Arc del projecte alternatiu rebutjat

En primer lloc s'ha de dir que en línies generals la façana reflectida en el dibuix no difereix molt de la finalment construïda pel

que fa a la disposició de buits. Només cal repetir les diferències en les tribunes de la segona planta i en el coronament, i destacar la presència de quatre escultures que representen figures humanes centrades amb els arcs a la tribuna del Pis Principal, inexistents en la versió construïda. Però aquesta és una qüestió decorativa que no fa a la matèria aquí tractada.

La diferència fonamental des de la perspectiva geomètrica i estàtica es troba en la forma dels arcs d'entrada que en aquest cas adopten un perfil molt rebaixat recolzats a una alçada de 4,15 metres sobre brancals verticals, els que curiosament no estan reflectides en el dibuix. Això sembla demostrar que aquesta part de la façana estava en constant procés d'estudi i canvi. Els arcs tenen una llum de 3,20 metres si assumim que els brancals són verticals.

L'adovellat està compost per peces d'ample regular. Com en el cas finalment construït, encara que menys acusadament, les dovelles van augmentant la seva altura al apropar-se a la clau, que en aquest cas sembla ser una peça central de 1,20 metres d'alçada. Hi ha allí uns grans medallons circulars que semblen ser la base per a les inicials d'Eusebio Güell que es van construir dins dels timpans dels arcs definitius.

Es pot veure un altre assaig de lligam de les dovelles amb el mur, en aquest cas no en forma esglaonada sinó amb elaborades corbes i contracorbes. Cal recordar que els arcs que es van dur a la pràctica tenen arrodonida només la part superior en les dovelles de la clau.

Com experiment es va procedir a dibuixar sobre aquest arc la corba de pressions amb el mètode gràfic de Gaudí. Com en el cas anterior es va dividir el mig arc en trams de

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

0,20 m. cada un, en aquest cas resultant 11. El càlcul de les càrregues sobre els trams està desenvolupat en l'Annex II al final d'aquest estudi.

El punt de ruptura va quedar situat en l'arrencada de l'arc tal com ho formula la bibliografia de l'època quan l'arc té un desenvolupament menor que 120º.³⁵

La forma de la corba obtinguda s'assembla a una paràbola a causa de que la càrrega és molt similar en tots els trams excepte en aquell que rep les jàsseres de l'entresòl, ja sobre el suport.

En l'última dovella (zona de suport) la corba escapa del terç central cap a fora, encara que això no provocaria col·lapse en comptar amb l'oposició dels murs de la façana que absorbirien aquesta empena i s'equilibrarien el conjunt.

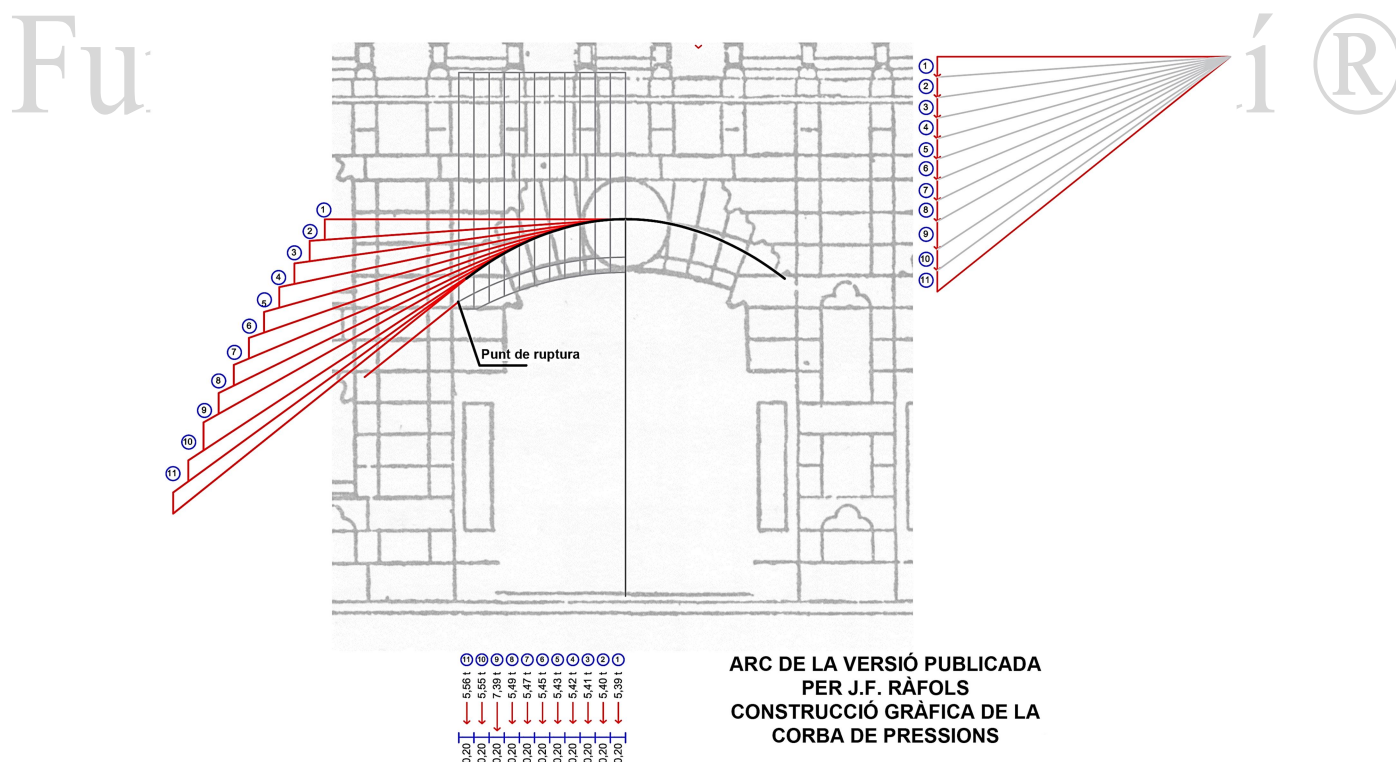
DEFINICIÓ DE LA FORMA DELS ARCS

En la determinació del perfil dels arcs van incidir condicionants diversos a més dels estrictament estàtics: Trobem factors funcionals, factors geomètrics i factors simbòlics i representatius. Analitzarem a continuació cada un d'ells:

FACTORS FUNCIONALS

Gaudí va dimensionar les portes basant-se en la necessitat funcional de permetre l'ingrés i sortida de grans carruatges. Va definir així un va de 3,20 m. d'ample i 3,75 m. d'altura que s'elevava al centre fins aproximadament els 4,35 metres, dimensions que encaixen amb comoditat en el projecte rebutjat amb els arcs rebaixats.

Aparentment havien de ser unes mesures



Construcció gràfica amb el mètode que utilitzava Gaudí de la corba de pressions de l'arc de la versió alternativa rebutjada

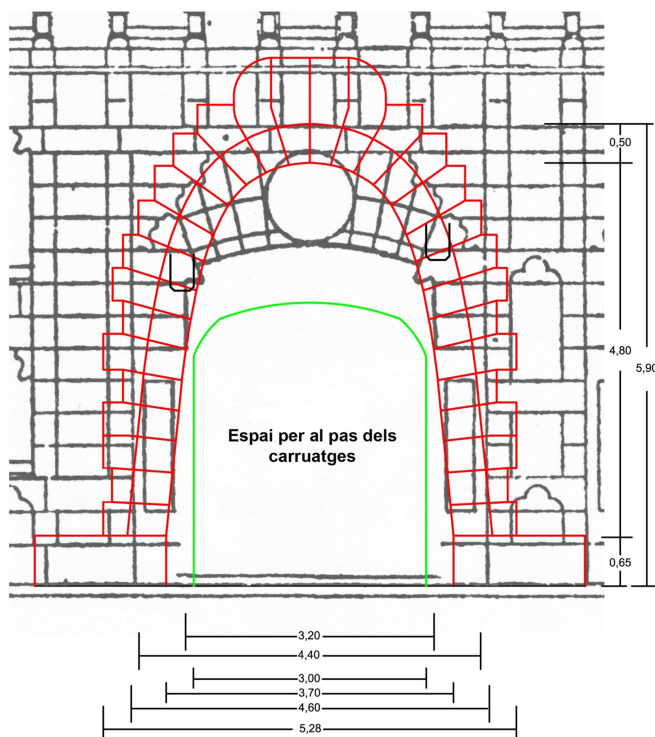
Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®



El va per al pas de carruatges en l'arc construït i la versió descartada superposades

amples per a les necessitats funcionals perquè el perfil definitivament adoptat en la construcció allotja unes portes una mica menors, d'una amplada de 3,00 m. i una alçada de 2,95 m. que a la part central arriba als 3,65 metres per sota el timpà.

Per això va haver de entrar en joc l'habilitat de Gaudí per adaptar els recursos als seus interessos quan va optar per elevar a 65 cm. els punts d'arrencada dels arcs mitjançant la incorporació d'uns petits trams verticals.

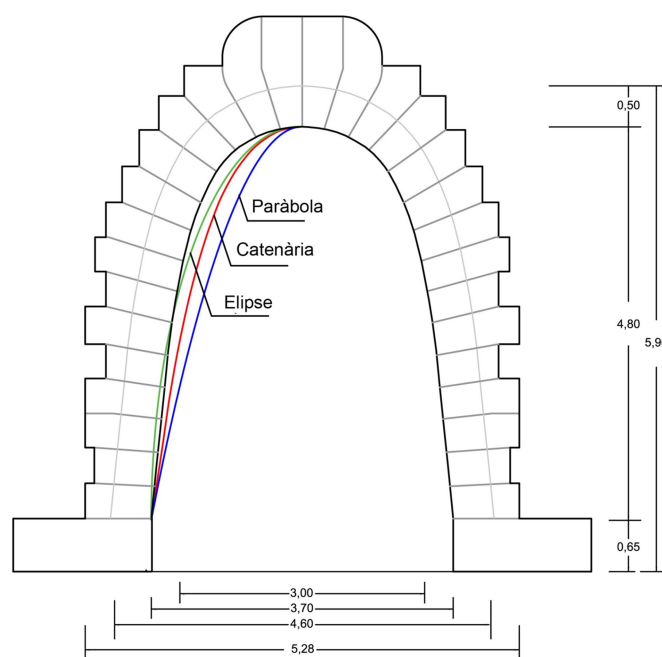
Amb aquest recurs va quedar solucionat el problema del pas dels carruatges ja que tot l'espai necessari va quedar d'aquesta manera inscrita amb comoditat dins de l'arc.

Aquests semblen ser els únics condicionants funcionals que van intervenir en el traçat del perfil dels arcs.

FACTORS GEOMÈTRICS

Ja s'ha parlat d'algunes relacions entre corbes regulars i determinats estats de càrregues. També es va arribar a la conclusió que la directriu més adequada des del punt de vista de l'estabilitat en el cas que ens ocupa és una corba bastant semblant a una paràbola prop de la clau per després estendre's cap a fora a mesura que es va acostant als suports.

Si confrontem aquesta corba amb l'intradós de la corba real traçant una paràbola que passi per la clau i els suports apareix evident la diferència: l'arc dissenyat per Gaudí és molt més obert que la paràbola, i a més l'el·lipse i la catenària. És, com ho van assenyalar Samper, González i Herrera, una corba Rankine, una "corba esteroestàtica" que resulta de l'aplicació de forces verticals



Comparació entre l'arc construït i l'el·lipse, la catenària i la paràbola

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

variables i forces horitzontals constants en els punts de la corba.

Això ens condueix directament a analitzar els factors de tipus simbòlic-representatiu, que ens permetran formular la hipòtesi sobre la inusual forma dels arcs.

FACTORS SIMBÓLICS I REPRESENTATIUS

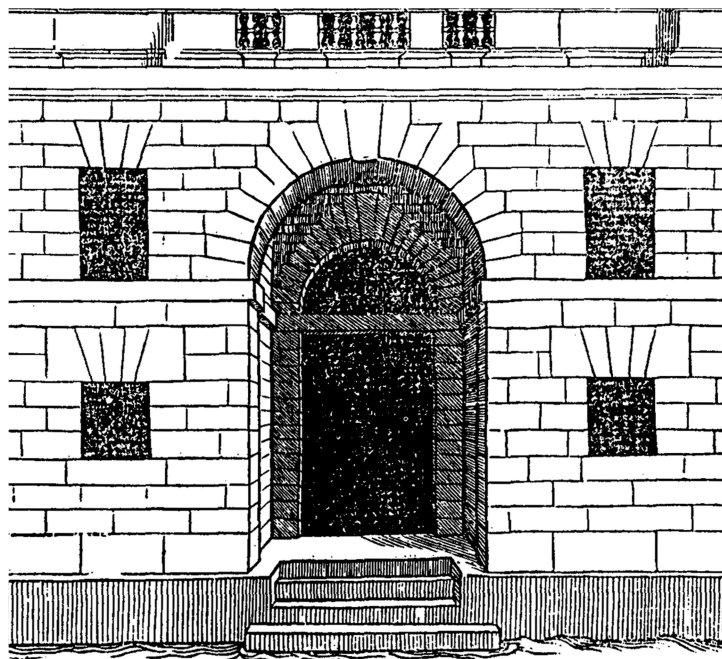
Eusebi Güell estava decidit a que el seu Palau fos un paradigma de modernitat. La coincidència de la seva construcció amb l'esdeveniment internacional més important que va viure Barcelona fins llavors, l'Exposició Universal de 1888, no va ser casual. Desitjava sorprendre el món amb una obra excepcional i ho va aconseguir. Es va preocupar de publicitar-ho en revistes nacionals i internacionals, i el palau va ser visitat per reis i presidents.³⁶

És difícil pensar que tanta dedicació provinent d'una persona activa i emprenedora no

estigués lligada a una implicació en el disseny de l'edifici i en especial de la seva imatge pública, la façana principal.

Són també moltes les referències a una relació entre Güell i Gaudí que va anar molt més lluny que una simple interacció entre client i arquitecte. Eren amics i coincidien en la seva visió de l'art -i l'arquitectura en especial- com a vehicle per comunicar idees. La Finca Güell, acabada poc temps abans amb el seu simbolisme fundat en la mitologia grega revisada a través del poema L'Atlàntida n'és un molt clar exemple.

Tot això suggereix que de comú acord Gaudí i Güell haurien optat per la solució més agosarada formalment per als arcs del Palau Güell: recórrer als traçats no tradicionals. La catenària s'havia utilitzat en els estables i el mirador construït a Pedralbes, però en aquest cas era un edifici de servei i una construcció secundària. Ara havien de ser la cara visible d'un gran palau.



Secció del dibuix d'un palau. El text diu: "Davantera feta a la manera que s'acostuma a Venècia". Del llibre IV de Serlio

No aliena a la forma dels arcs ha d'haver estat l'interès per dotar l'ingrés a l'edifici d'unes enormes inicials del seu propietari. Les elaboradíssimes inicials "I" i "G" de ferro forjat que se situen en els timpans dels arcs segurament eren massa importants per al seu amo com per a romandre tancades en uns cercles sobre els arcs d'ingrés, com es mostra en l'alternativa rebutjada. Havien de compondre juntament amb l'espectacular escut situat al centre un conjunt impressionant. Els arcs finalment adoptats amb el seu gran desenvolupament en amplada a la part superior obren l'espai necessari.

S'ha analitzat abans el paper de l'adovellat a l'estabilitat dels arcs. També té una funció representativa. No

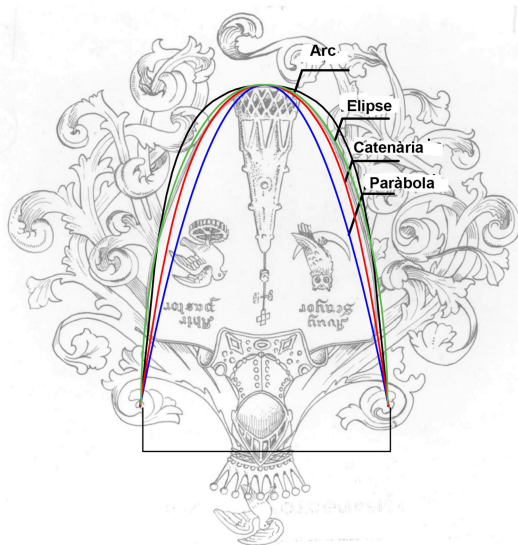
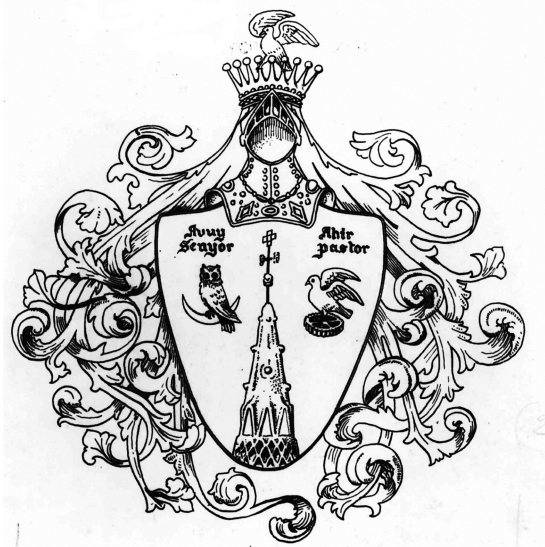
Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

L'ESCUT NOBILIARI D'EUSEBI GÜELL PUBLICAT PER
JOAN BERGÓS I COMPARACIÓ AMB EL PERFIL DE
L'ARC DEL PALAU GÜELL, LA ELIPSE, LA CATENÀRIA
I LA PARÀBOLA



L'escut nobiliari d'Eusebio Güell publicat per Joan Bergós i comparació amb el perfil de l'arc del Palau Güell, l'el·lipse, la catenària i la paràbola.

sembla casual que s'hagi adoptat una forma palatina amb clara inspiració en Serlio. En aquest context cal assenyalar que no van ser pocs els paral·lelismes traçats entre Eusebi Güell i els senyors renaixentistes.

La vocació nobiliària es reflecteix en el lema inscrit en l'escut que s'afirma va dissenyar Gaudí per Güell: "Avuy Senyor, Ahr pastor".³⁷ No deixa de cridar l'atenció la forma de l'emblema: Està envoltat per una corba que conté entre altres imatges la cúpula del Palau Güell. Bergós la defineix com catenària, però la corba en qüestió no és ni catenària ni paràbola, ni coincideix amb la forma de l'arc, sinó que és molt semblant a una el·lipse com ho demostra la superposició d'aquestes corbes per sobre del dibuix.

UNA HIPÒTESI SOBRE LA DETERMINACIÓ DE LA FORMA DELS ARCS

Gaudí no deixava detalls a l'atzar. Tot era meticulosament estudiat en els seus projectes i reelaborat moltes vegades en el transcurs de la construcció. Nombrosos testimonis donen compte d'això que és clarament observable quan s'aprofundeix en l'estudi de les seves obres.

Això ens indueix a pensar que un tema de disseny tan important com la forma dels arcs dels portals de la façana del Palau Güell ha de respondre a algun criteri. Hem repetit al llarg d'aquest text que no és catenària ni paràbola ni el·lipse i ho hem verificat gràficament. Hem demostrat que no respon a la corba de pressions dictada per l'estat de càrregues.

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

Però la forma evidentment no podia ser qualsevol. Havia respondre a alguna raó, a alguna llei. Finalment va ser adoptat per als portals un "arc estereostàtic" o "corba Rankine". Així ho van demostrar les investigacions citades.

Hem analitzat també els factors que van influir en la determinació d'aquesta inusual forma. No és menor la importància del caràcter simbòlic d'aquests elements. El seu traçat havia d'estar lligat d'alguna manera a una imatge de modernitat. Havia de sintetitzar art i ciència representant l'esperit de la seva època.

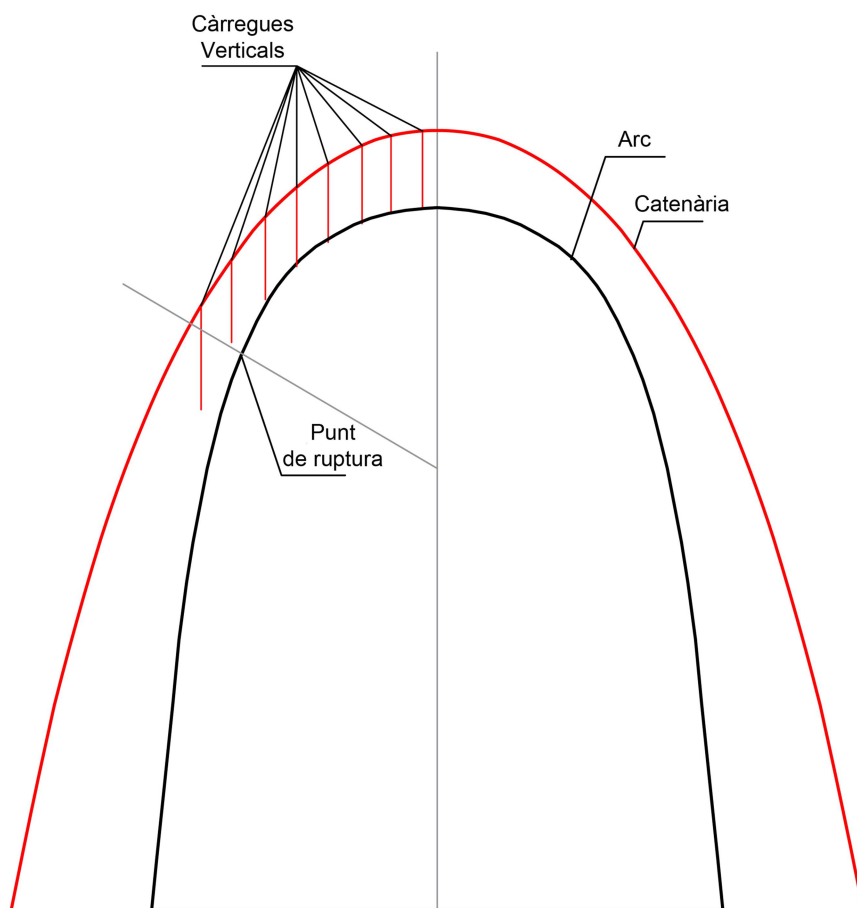
En aquesta línia de pensament i com a hipòtesi s'incorpora a continuació un estudi geomètric que sembla donar una explicació de com va poder haver arribat Gaudí al perfil definitiu dels arcs, o almenys a un tram d'ell. S'ha d'aclarir qu'és tracta d'una conjectura que per cert és impossible de demostrar.

Ja es va parlar de les relacions estudiades per W. Rankine entre la forma d'un arc –l'*intradós*– i la línia que ell va denominar *extradós* que sorgeix de dibuixar des de cada punt de l'arc línies verticals que representen les intensitats de les càrregues en cada un dels i unir els extrems.

Seguint a Rankine, si s'aplica aquest procediment als arcs del Palau Güell la corba obtinguda dibuixa una catenària entre la clau i el punt de ruptura. Més enllà d'aquest punt la línia de extradós així obtinguda s'aparta de la corba.

El que aquí es proposa és que la corba de l'arc sorgiria aplicant inversament el procediment: partint d'una catenària que exerciria d'extradós poden ser traçades cap avall les verticals representant les càrregues en cada punt. Els nous punts així obtinguts dibuixen una corba que seria l'arc definitiu.

Es tracta d'un procediment en el qual intervenen únicament mitjans gràfics. Una catenària és fàcilment dibuixable amb mètodes que Gaudí havia de conèixer a l'haver estat publicats per exemple per Rondelet, com es va dir més amunt. Des d'aquesta corba obtinguda gràficament



Construcció de l'arc com intradós d'un extradós de perfil catenàric mitjançant l'aplicació de les forces actuants representada per línies verticals

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

considerada com extradós es poden aplicar de la forma indicada les forces actants ja calculades i traçar la corba que seria l'intradós.

El mètode no és assimilable a la catenària transformada, corba que es dibuixa partint d'una catenària preservant les coordenades horitzontals des de l'eix però alterant les verticals en un determinat valor constant de manera que es manté la condició que la intensitat en cada punt és proporcional a l'ordenada traçada des d'aquest punt, tal com va ser explicat abans.

El concepte en canvi s'ajusta a la definició d'arcs estereostàtics, resultat de distribuir càrregues verticals variables de manera simètrica respecte de l'eix que passa per la clau de l'arc.

En qualsevol cas aquesta forma de dibuixar l'arc explicaria la corba entre la clau i el punt de ruptura, però no la seva continuïtat fins als suports: El que s'ha dit no passa de ser una especulació, una simple constatació del que pot ser res més que una coincidència.

Com també pot ser-ho en definitiva la gran semblança del perfil de l'arc amb la corba Rankine. Les raons que van conduir a Gaudí a dotar d'aquesta forma als arcs i el mètode usat per al seu traçar quedaran com a incògnites a dilucidar. Potser el lamentable incendi del taller de la Sagrada Família el 1936 es va dur també la resposta a aquests interrogants.

CONCLUSIONS

De tot el analitzat abans extraurem ara unes conclusions.

La forma dels arcs dels portals del Palau Güell sembla ser una decisió estètica i simbòlica associada a les aspiracions representatives del

propietari, Eusebi Güell, subordinant la seva correspondència amb la directriu dictada per les condicions estàtiques.

Els arcs adoptats compleixen amb les condicions d'equilibri, com es va demostrar gràficament, però no segueixen la corba de pressions. Com es va traçar i es va traslladar la seva directriu a la pedra és una cosa que queda en conjectures.

La forma de contruir arcs per part de Gaudí va ser en nombrosos casos projectar-los seguint el perfil resultant de les condicions de càrrega. Això li garantia l'estabilitat, com va poder aprendre de la bibliografia al seu abast. En això marcava diferència amb la majoria d'arquitectes que utilitzaven els mètodes gràfics per a verificar l'estabilitat de les formes projectades. En aquest cas es va apartar de la seva regla, segurament d'acord amb el seu client i amic.

En el cas que Gaudí, amb l'objecte d'assolir la forma millor adaptada a l'equilibri hi hagués aquí utilitzat un model penjant amb pesos representant les càrregues a què està sotmès l'arc, de la mateixa manera no va adoptar finalment aquest perfil. Posteriorment es valdrà del mètode de la maqueta per als arcs de l'àtic de la Pedrera i a partir d'aquest principi desenvoluparà un sistema tridimensional per al disseny d'un edifici sencer: l'església de la Colònia Güell.

No obstant això les qüestions d'estabilitat no van ser alienes al disseny dels arcs del Palau Güell: el seu perfil té en compte l'incidència de les càrregues de les jàsseres de l'entresòl. D'altra banda la gran alçada de les dovelles de la clau eleva la corba de pressions i permet la seva conducció dins de la zona segura en el punt de ruptura.

Des del punt de vista de la funcionalitat l'elevació des del pla de sòl dels punts

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

d'arrencada dels arcs en 65 cm. va permetre incloure en el va de l'arc l'espai necessari per al pas de grans carruatges.

A més el traçat dels arcs amb la part alta eixamplada va permetre l'espai necessari per a allotjar les escultòriques inicials de ferro forjat del propietari en els timpans.

No es va poder arribar una raó geomètrica o estàtica que definís el perfil dels arcs. Només es va assajar com a conjectura l'existència d'algunes relacions formals entre una catenària i la secció de l'arc propera a la clau a partir d'interpretar a la primera com l'extradós de la corba de l'arc.

Algunes dades d'importants sorgeixen de l'estudi de la configuració constructiva del Palau Güell. És interessant assenyalar que aquesta sembla ser la primera ocasió en què Gaudí va fer servir perfils metàl·lics per a la construcció dels forjats en lloc de les bigues de fusta que havia usat en totes les seves obres anteriors. Es tractava llavors d'un material extremadament innovador en arquitectura residencial tot i tenir ja força anys d'ús en obres d'enginyeria i monumentals. S'havien construït ja esglésies amb estructura metàl·lica a la vista, com Saint-Augustin de París, obra de Víctor Baltard de 1860-1871.

Cal tenir en compte que el primer ús arquitectònic estructural de l'acer data del 1884-1885, a l'edifici d'oficines de la Home Insurance Company de Chicago projectat per William Le Baron Jenney, on l'estructura metàl·lica era parcialment d'aquest metall, només a les plantes superiors.³⁸ El 1889, quan el Palau Güell estava ja construït, el mateix Le Baron Jenney farà servir per primera vegada una estructura sustentadora completament d'acer en el segon edifici Leiter, també a Chicago. El mateix any dues grans obres

destinades a la propaganda de les possibilitats de les estructures metàl·liques es construïren per a l'Exposició Universal de París: La Galerie des Machines i la Torre Eiffel.

Aquestes dades no fan sinó demostrar l'enorme vocació de modernitat que va infondre Güell –i Gaudí– al seu palau, a manera de manifest constructiu, el que explica la seva desafecció per algunes formes tradicionals en favor d'altres que fossin capaços de transmetre els valors que desitjava representar. Per exemple ho evidencien els elements estructurals metàl·lics que van quedar a la vista a la sala principal de l'edifici, cosa completament inhabitual en aquells dies i gairebé una bestreta de l'expressionisme constructiu que es va pregonar dècades més tard. Així podria ser explicada també la inusual directriu dels arcs dels portals principals, encara que en aquest cas hem vist que la seva forma no sorgeix del dictat de la mecànica.

Fins que es pugui demostrar el contrari sembla més fruit de la casualitat que d'una recerca projectual el fet que el seu perfil s'assembla notablement a una corba Rankine. En qualsevol cas, com es va dir, pot proposar-se una hipòtesi arriscada sobre la forma en què es va traçar aquest perfil, però sense respondre a raons d'estabilitat.

Gaudí era un arquitecte que reunia com pocs tots els components de l'arquitectura. Se li atribueix l'expressió "és l'estètica i no l'estàtica la que determina les formes", pel que sembla en discrepància amb un article del seu col·laborador Joan Rubió.³⁹ L'estudi de les seves obres demostra que tot en elles té un perquè i tot respon a un principi general d'unitat que, si es vol expressar d'una manera ja incorporat a la terminologia gaudiniana, és producte d'un concepte orgànic de l'arquitectura.

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

Aquí sembla primar com a idea general de la concepció d'aquest palau la vocació d'homenatjar la modernitat encarnada en el seu propietari, Eusebi Güell. És en aquest marc que s'exposa aquesta hipòtesi sobre les motivacions de la forma dels arcs de la façana del Palau Güell.

NOTES

¹ Parcialment publicat en SCIORTINO, BIBIANA i ANDRUET, MARIO. Gaudí y la geometría. Revista Gaudí Club. Barcelona. Nº 14, Juliol de 1995; Nº 15, Desembre de 1995; Nº 16, Abril de 1996; Nº 17, Edició especial, Setembre de 1996; i Nº 18, Març de 1997.

² Blas Herrera, del grup Applied Geometry del Departament d'Enginyeria Informàtica i Matemàtiques (DEIM); Albert Samper, de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, i Genaro González, del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.

³ SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2017).

⁴ SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS (2016)

⁵ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1843). "Description of a method of laying down railway curves on the ground". Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 2. 1843. Pp. 108-111.

⁶ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. A manual of applied mechanics. Griffin. London. 1858. Traducció al francès de la 7ª ed. per A. Vialay: Manuel de mécanique appliquée. Dunod. París. 1876.

RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. A manual of civil engineering. Griffin, Bohn and Company. London. 1862.

⁷ BASSEGODA NONELL, JOAN. El Gran Gaudí. AUSA. Sabadell. 1989. P.514.

⁸ Ibid. P.288.

⁹ GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS I CASALS BALAGUÉ, ALBERT (2005).

¹⁰ RÀFOLS FONTANALS, JOSEP (1929).

¹¹ VIOLLET-LE-DUC, EUGÈNE EMMANUEL. Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle. Libraires-Imprimeries Réunies. Paris 1854-68. Tomo IV. P. 56.

¹² RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1876) P. 203

¹³ Ibid. Pp.219-221.

¹⁴ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) Pp. 202-203. (1876). Pp.190-191 y 200-201.

¹⁵ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) P.203.

¹⁶ MOSELEY, HENRY. (1843). P. 380.

¹⁷ Ibid. P. 432.

¹⁸ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862) Pp. 202-203. (1876). Pp.190-191 y 200-201.

¹⁹ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). Pp.186-188.

²⁰ Aquest assumpte va ser tractat al llarg del segle XIX per diversos estudiosos com Henry Moseley, Edouard Mery o Karl Culmann.

²¹ RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN. (1862). Pp. 416-417. (1876). Pp.256-257.

²² Ibid. P. 437.

²³ RUBIÓ BELLVER, JOAN (1913).

²⁴ Existe una reconstrucció en el Museu de Les Aigües de Cornellà de Llobregat

²⁵ SCIORTINO, BIBIANA (2004). P. 113.

²⁶ GAUDÍ, ANTONIO. Manuscrit de Reus. 1876-1879.

²⁷ BERGÓS MASSÓ, JOAN. (1953) P.258.

²⁸ BASSEGODA NONELL, JOAN (2003).

²⁹ RONDELET, JEAN BAPTISTE. (1802). Pp. 70-74. Explica com es va valer d'un model per a dissenyar l'arc catenàric que sosté la columnata de la cúpula i la llanterna de l'església de Sainte Geneviève, de París. Es refereix a la catenària com la directriu adequada per formar arcs i voltes i exposa el mètode gràfic que permet obtenir els punts de la corba.

³⁰ RÀFOLS FONTANALS, JOSEP (1929).

³¹ És una simplificació desenvolupada pel mateix Gaudí del mètode que va aprendre del seu professor a l'Escola d'Arquitectura, Joan Torras Guardiola, que al seu torn ho va prendre de Méry. SCIORTINO, BIBIANA. (2004).

Els arcs de la façana del Palau Güell. Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

³² GONZÁLEZ, ANTONI I CARBÓ, PABLO (1990). P. 33.

³³ Ibid. P. 66.

³⁴ AUDIOSCAN ENGINYERIA DEL SO. Estudi d' allament acústic del Palau Güell. 1997.

³⁵ DUPUIT, J. Traité de l'équilibre des voutes et de la construction de voutes des ponts en maçonnerie, Dunod. Paris. 1870. P. 88.

³⁶ Entre d'altres: Diari de Barcelona (17-12-1889); La Vanguardia (28-12-1889. suplement. p. 8); Decorator and Furnisher (Gener 1892. pp. 145, 146, 217 i 219); American Architect and Building News. Boston (9-7-1892. p. 27); Academy Architecture and Architectural Review (VII. Vol. 9. London. 1r semestre 1896. p. 21); Il·lustración Hispanoamericana (11-1-1891); Arquitectura Moderna de Barcelona (1900. Làm. XCII. Pp. 158-160); Arquitectura y Construcción (any X. Nº 163. Febrer 1906; Nº 169. Agost 1906; año XI. Nº 178. Maig 1907).

³⁷ BERGÓS MASSÓ, JOAN. (1974). P.54.

³⁹ GIEDION, SIGFRIED Space, Time and Architecture. The Growth of a New Tradition. Harvard University Press. Cambridge (Massachussets). 1941. Ed. Espanyola: Espacio, Tiempo y Arquitectura (2009). Ed. Reverté. Barcelona. P. 385.

⁴⁰ RUBIÓ BELLVER, JOAN (1913).

BIBLIOGRAFIA

BASSEGODA NONELL, JOAN,

-El arco de festón, Memòries de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts, 3ª època, núm. 847, Vol. XLVI, nº20. Barcelona. 1985.

-Tradición e innovaciones técnicas en la arquitectura de Gaudí. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAAT Granada, CEHOPU, 2000.Pp. 97-102.

-Josep Bayó Font, contractista de Gaudí. Edicions UPC. Barcelona. 2003.
ISBN: 8483016753

ISBN-13: 9788483016756

BERGÓS MASSÓ, JOAN.

-Materiales y elementos de construcción. Estudio experimental. Barcelona. Bosch. 1953.

-Gaudí, l'home i l'obra. Bosch. Barcelona 1954.

CHANDÍAS, MARIO E. Cómputos y Presupuestos. Ed. Alsina. Buenos Aires. 1983. ISBN 9505530099.

GAUDÍ, ANTONI. Manuscrit de Reus. 1876-1879. Original en el Museu Comarcal de Reus.

GONZÁLEZ, ANTONI I CARBÓ, PABLO. La azotea fantástica (la cubierta del Palau Güell). Informes de la Construcción, Vol. 42 n.º 408, juliol/agost, 1990.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS. Understanding historical structures: Gaudí and the Palau Güell. CIMNE, Barcelona. 1998.

GONZÁLEZ MORENO-NAVARRO, JOSÉ LUIS i CASALS BALAGUÉ, ALBERT.

-Gaudí i la construcció. Catàleg de la Exposició Gaudí. La recerca de la forma. Espai, geometria, estructura i construcció. Lunwerg Editors. Barcelona. 2002. ISBN: 84-7782-724-9 (cartoné). ISBN: 84-7782-727-3 (rústica).

-La insondable organización constructiva del Palacio Güell de Barcelona, obra de Antoni Gaudí. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29 enero 2005, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz, 2005.

MOSELEY, HENRY. The mechanical principles of engineering and architecture. Longman, Brown, Green and Longmans. London. 1843.

RÀFOLS FONTANALS, Josep. Gaudí (1852 1926). Canosa, Barcelona 1929.

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

RANKINE, WILLIAM JOHN MACQUORN.

-A manual of applied mechanics. Griffin. London. 1858. Traducció al francès de la 7ª ed. por A. Vialay: Manuel de mécanique appliquée. Dunod. París. 1876.

-A manual of civil engineering. Griffin, Bohn and Company. London. 1862.

RONDELET, JEAN BAPTISTE. Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir. M. A. Rondelet Fils. París. 1802.

RUBIÓ BELLVER, JOAN. Dificultats per a arribar la síntesis arquitectònica. Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña. 1913. Pp. 63-79.

SAMPER, ALBERT; GONZÁLEZ, GENARO; HERRERA, BLAS.

-Determination of the geometric shape which best fits an architectural arch within each of the conical curve types and hyperbolic-cosine curve types: The case of Palau Güell by Antoni Gaudí. Journal of Cultural Heritage. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2016.11.015>

-Classification by Type of the Arches in Gaudí's Palau Güell. Nexus Network Journal. September 2017
DOI: 10.1007/s00004-017-0355-7

SCIORTINO, BIBIANA. Los conceptos estructurales de Gaudí. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2004.

ANNEX I

ANÀlisi DE LES CÀRREGUES QUE INCIDEIXEN SOBRE ELS ARCS

Els arcs dels portals del Palau Güell reben la càrrega repartida de la façana i forjats fins al nivell inferior del forjat sobre Planta Baixa més la càrrega del tram de mur entre el forjat sobre Planta Baixa i l'intradós de l'arc (els carcanyols). A més en el tram corresponent suporten la càrrega de les jàsseres de l'entresòl.

DADES PER AL CÀLCUL

Extrets dels informes dels restauradors de l'edifici.
Forjats:

IPN 16: 17,90kg/ml

Per una separació entre eixos 0,65: 1,52 ml = 27,1 kg/m².

Mortor: 1.600 kg/m³

Maçoneria de maó i mortor de calç: 1.700 kg/m³

Paviment de rajoles amb mortor: 20 kg/cm. de gruix.

Cel-ras de fusta inclosa estructura: 25 kg/m²

Sobrecàrregues: S'adopta una sobrecàrrega de 100 kg/m² com a sobrecàrregues estàtiques (mobles i objectes). No es consideren les sobrecàrregues dinàmiques (persones).

Murs: Mur de pedra calcària: 2450 kg/m³

1. CÀRREGUES DELS FORJATS

Coberta

Perfils d'acer.....27,10 kg/m²

Mortor: 1.600 kg/m³ x 0,20 x

0,30/2 x 3.....144,00 "

Revoltons: 20 x 2,5..... 50,00 "

Tauler: 20 x 4 x 3.....240,00 "

Enrajolat: 20 x 2,5.....50,00 "

Cel-ras fusta.....30,00 "

Total.....541,10 kg/m²

Superfície d'incidència per ml. de façana: 2,60 m²

541,10 kg/m² x 2,60 m²1.406,86 kg

Planta sota coberta

Estructura de fusta.....245,00 kg/m²

Enrajolat: 20 x 15.....300,00 "

Sobrecàrrega:.....100,00 "

Total.....645,00 kg/m²

Superfície d'incidència per ml. de façana: 2,60 m²

645,00 kg/m² x 2,60 m²1.651,00 kg

Planta segona

Estructura de fusta.....315,00 kg/m²

Sobrecàrrega:.....100,00 "

Total.....415,00 kg/m²

Superfície d'incidència per ml. de façana: 2,60 m²

415,00 kg/m² x 2,60 m²1.079,00 kg

Planta primera

Perfils d'acer.....27,10 kg/m²

Mortor: 1.600 kg/m³ x 0,20 x

0,30/2 x 3.....144,00 "

Revoltons: 20 x 2,5.....50,00 "

Tauler: 20 x 4 x 3.....240,00 "

Enrajolat: 20 x 2,5.....50,00 "

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

Cel-ras fusta.....100,00 “
Sobrecàrrega:.....100,00 “
Total.....711,10 kg/m²
Superfície d'incidència per ml. de façana: 2,60 m²
711,10 kg/m² x 2,60 m²1.848,60 kg

Total càrrega forjats i coberta:

1.406,86 + 1.651,00 + 1.079,00
+ 1.848,6.....5.985,46 kg/ml.

2. MUR FAÇANA

Mur pedra calcària 0,70 m. gruix

Pes: 2.450 kg/m³

Alçada des de nivell inferior forjat Planta baixa: 14,00 m. A causa dels nombroses forats s'aplicarà un coeficient de reducció:

Superfície mur: 23,50 x 14,00= 329,00 m²

Superfície forats: 3,60 x 14 + 3,25 x 6 + 5,15 + 2,75 x 14 + 3,70 + 7,85 + 2,40 x 5 + 12,80 + 4,70 x 2 + 0,70 x 2 + 4,40 x 2 + 7,10 x 3= 196,80 m²

Superfície efectiva mur: 329,00 – 196,80= = 132,20 m²

Superfície voladissos pedra: (2,10 + 3,20 + 19,50) x 1,00= 24,80 m²

Pes voladissos: 24,80 x 0,25 x 2.450 kg/m³= 15.376 kg

Pes mur per sobre claus arcs:

132,20 m² x 2.450 kg/m³= 323.890 kg + 15.376 kg (voladissos)= 339.266 kg

Incidència per ml. de façana: 339.266 / 23,50 m= 14.436,85 kg

Incidència coronament:

(2.450 kg/m³ x 0,50 x 1,50 m.*) + 200 kg. (xemeneies)=.....2.037,50 kg/ml.

* Mitjana d'altura del parament

Total càrrega mur façana

14.436,85 + 2.037,50= 16.474,35 kg/ml.

TOTAL CÀRREGA REPARTIDA A NIVELL INFERIOR SOSTRE DE PLANTA BAIXA:

5.985,46 + 16.474,3522.459,81 kg/ml.

3. CÀRREGUES PUNTUALS ENTRESÒL

(aplicades a 1,65 m. de la clau)

Planta Entresòl

Perfils d'acer.....27,10 kg/m²

Mortor: 1.600 kg/m³ x 0,20 x

0,30/2 x 3.....144,00 “

Revoltons: 20 x 2,5.....50,00 “

Tauler: 20 x 4 x 3.....240,00 “

Enrajolat: 20 x 2,5.....50,00 “

Sobrecàrrega:.....100,00 “

Total.....611,10 kg/m²

Jàssera lateral

Càrrega forjat:1,30 x 0,70

x 611,10 kg/m².....556,10 kg.

Pes envà: 0,15 x 3,00

x 1.800 kg/m³.....810 kg.

Pes propi: 0,30 x 0,60 x 0,70

x 2.450 kg/m³.....308,70 kg.

Total càrrega jàssera exterior= 1.674,80 kg.

Jàssera central

Càrrega forjat:1,20 x 0,90

x 611,10 kg/m².....659,88 kg.

Pes envà: 0,15 x 3,00

x 1.800 kg/m³.....810 kg.

Pes propi: 0,30 x 0,60 x 0,90

x 2.450 kg/m³.....396,9 kg.

Total càrrega jàssera interior= 1.866,78 kg.

4. CARCANYOLS I PES PROPI DE L'ARC

Es mesura aquesta secció des del pla inferior del forjat de Planta Baixa fins a l'intradós de l'arc. Com a mètode de càlcul per descomptar el rebaix de l'intradós de l'arc es considerarà una mitjana entre la cara exterior i la cara interior en cada tram.

S'analitzarà la càrrega sobre un semiarc entre la clau i el punt de ruptura. Aquest es situa a la junta a un angle de 60º des de l'eix de l'arc. El semiarc es dividirà en 12 trams de 0,20 m. cadascun.

Material: Mur pedra calcària (2450 kg/m³). Gruix: 0,70 m.

Tram 1

Cara exterior: 0,20 x (1,05 + 1,07) / 2= 0,212 m²

Cara interior: 0,20 x (1,55 + 1,57) / 2= 0,312 m²

Volum: (0,212 + 0,312) / 2 x 0,70= 0,183 m³

Pes: 2450 kg/m³ x 0,183 m³= 449 kg

Tram 2

Cara exterior: 0,20 x (1,07 + 1,10) / 2= 0,217 m²

Cara interior: 0,20 x (1,57 + 1,62) / 2= 0,319 m²

Volum: (0,217 + 0,319) / 2 x 0,70= 0,188 m³

Pes: 2450 kg/m³ x 0,188 m³= 460 kg

Tram 3

Cara exterior: 0,20 x (1,10 + 1,15) / 2= 0,225 m²

Cara interior: 0,20 x (1,62 + 1,70) / 2= 0,332 m²

Volum: (0,225 + 0,332) / 2 x 0,70= 0,195 m³

Pes: 2450 kg/m³ x 0,195 m³= 478 kg

Tram 4

Cara exterior: 0,20 x (1,15 + 1,23) / 2= 0,238 m²

Cara interior: 0,20 x (1,70 + 1,80) / 2= 0,350 m²

Volum: (0,238 + 0,350) / 2 x 0,70= 0,206 m³

Pes: 2450 kg/m³ x 0,206 m³= 504 kg

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí®

Tram 5

Cara exterior: $0,20 \times (1,23 + 1,33) / 2 = 0,256 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (1,80 + 2,01) / 2 = 0,381 \text{ m}^2$

Volum: $(0,256 + 0,381) / 2 \times 0,70 = 0,223 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,223 \text{ m}^3 = 546 \text{ kg}$

Tram 6

Cara exterior: $0,20 \times (1,33 + 1,60) / 2 = 0,293 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (2,01 + 2,41) / 2 = 0,442 \text{ m}^2$

Volum: $(0,293 + 0,442) / 2 \times 0,70 = 0,257 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,257 \text{ m}^3 = 630 \text{ kg}$

Tram 7

Cara exterior: $0,20 \times (1,60 + 1,75) / 2 = 0,335 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (2,41 + 2,99) / 2 = 0,540 \text{ m}^2$

Volum: $(0,335 + 0,540) / 2 \times 0,70 = 0,306 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,306 \text{ m}^3 = 750 \text{ kg}$

Tram 8

Cara exterior: $0,20 \times (1,75 + 2,08) / 2 = 0,383 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (2,99 + 3,98) / 2 = 0,697 \text{ m}^2$

Volum: $(0,383 + 0,697) / 2 \times 0,70 = 0,378 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,378 \text{ m}^3 = 926 \text{ kg}$

Tram 9

Cara exterior: $0,20 \times (2,08 + 2,55) / 2 = 0,463 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (3,98 + 5,69) / 2 = 0,967 \text{ m}^2$

Volum: $(0,463 + 0,967) / 2 \times 0,70 = 0,501 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,501 \text{ m}^3 = 1.226 \text{ kg}$

Tram 10

Cara exterior: $0,20 \times (2,55 + 3,35) / 2 = 0,590 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times (5,69 + 6,35) / 2 = 1,204 \text{ m}^2$

Volum: $(0,590 + 1,204) / 2 \times 0,70 = 0,628 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,628 \text{ m}^3 = 1.538 \text{ kg}$

Tram 11

Cara exterior: $0,20 \times (3,35 + 4,87) / 2 = 0,822 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times 6,35 = 1,270 \text{ m}^2$

Volum: $(0,822 + 1,270) / 2 \times 0,70 = 0,732 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,732 \text{ m}^3 = 1.794 \text{ kg}$

Tram 12

Cara exterior: $0,20 \times (4,87 + 6,35) / 2 = 1,122 \text{ m}^2$

Cara interior: $0,20 \times 6,35 = 1,270 \text{ m}^2$

Volum: $(1,122 + 1,270) / 2 \times 0,70 = 0,837 \text{ m}^3$

Pes: $2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,837 \text{ m}^3 = 2.051 \text{ kg}$

5. CÀRREGUES QUE INCIDEIXEN SOBRE ELS ARCS

Tram 1

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:449 kg

Total:4.941 kg

Tram 2

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:460 kg

Total:4.952 kg

Tram 3

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:478 kg

Total:4.970 kg

Tram 4

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:504 kg

Total:4.996 kg

Tram 5

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:546 kg

Total:5.038 kg

Tram 6

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:630 kg

Total:5.122 kg

Tram 7

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:750 kg

Total:5.242 kg

Tram 8

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:926 kg

Càrrega jàssera entresòl: 1.675 (lateral)/

1.867 kg. (central)

Total: 7.093 (ext.) / 7.285 kg

Tram 9

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:1.226 kg

Total:5.718 kg

Tram 10

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:1.538 kg

Total:6.030 kg

Tram 11

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:1.794 kg

Total:6.286 kg

Tram 12

Càrrega murs: $22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$

Càrrega carcanyol:2.051 kg

Total:6.543 kg

ANNEX II

ANÀlisi DE LES CÀRREGUES QUE INCIDEIXEN SOBRE ELS ARCS SEGONS EL PROJECTE REBUTJAT AMB ARCS REBAIXATS

Com en el cas dels arcs que finalment van ser construïts reben la càrrega repartida de la façana i

Els arcs de la façana del Palau Güell.

Hipòtesi sobre la seva conformació

Autor: Mario Andruet *



Fundació Antonio Gaudí ®

forjats fins al nivell inferior del forjat sobre Planta Baixa a més la càrrega del tram de mur entre el forjat sobre Planta Baixa i l'intradós de l'arc. Igualment en el tram corresponent suporten la càrrega de les jàsseres de l'entresòl.

La càrrega repartida a nivell inferior del forjat sobre Planta Baixa i les càrregues puntuals de l'entresòl són iguals que en el cas anterior. Calcularem les càrregues corresponents al tram entre el forjat de la Planta Baixa i l'intradós de l'arc. El dibuix mostra unes dovelles més regulars, amb intradós sense rebaix.

El semiarc es va dividir en 11 trams de 0,20 m. cadascun.

Tram 1

$$0,20 \times (2,63 + 2,64) / 2 \times 0,70 = 0,369 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,369 \text{ m}^3 = 904 \text{ kg}$$

Tram 2

$$0,20 \times (2,64 + 2,66) / 2 \times 0,70 = 0,371 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,371 \text{ m}^3 = 909 \text{ kg}$$

Tram 3

$$0,20 \times (2,66 + 2,68) / 2 \times 0,70 = 0,378 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,378 \text{ m}^3 = 915 \text{ kg}$$

Tram 4

$$0,20 \times (2,68 + 2,71) / 2 \times 0,70 = 0,377 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,377 \text{ m}^3 = 924 \text{ kg}$$

Tram 5

$$0,20 \times (2,71 + 2,76) / 2 \times 0,70 = 0,383 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,383 \text{ m}^3 = 938 \text{ kg}$$

Tram 6

$$0,20 \times (2,76 + 2,81) / 2 \times 0,70 = 0,390 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,390 \text{ m}^3 = 956 \text{ kg}$$

Tram 7

$$0,20 \times (2,81 + 2,87) / 2 \times 0,70 = 0,398 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,398 \text{ m}^3 = 974 \text{ kg}$$

Tram 8

$$0,20 \times (2,87 + 2,95) / 2 \times 0,70 = 0,407 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,407 \text{ m}^3 = 998 \text{ kg}$$

Tram 9

$$0,20 \times (2,95 + 3,04) / 2 \times 0,70 = 0,419 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,419 \text{ m}^3 = 1.027 \text{ kg}$$

Tram 10

$$0,20 \times (3,04 + 3,11) / 2 \times 0,70 = 0,431 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,431 \text{ m}^3 = 1.054 \text{ kg}$$

Tram 11

$$0,20 \times 3,11 \times 0,70 = 0,435 \text{ m}^3$$

$$\text{Pes: } 2450 \text{ kg/m}^3 \times 0,435 \text{ m}^3 = 1.067 \text{ kg}$$

CÀRREGUES QUE INCIDEIXEN SOBRE ELS ARCS

Tram 1

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg.}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 904 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.396 \text{ kg}$$

Tram 2

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg.}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 909 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.401 \text{ kg}$$

Tram 3

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg.}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 915 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.407 \text{ kg}$$

Tram 4

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 924 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.416 \text{ kg}$$

Tram 5

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 938 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.430 \text{ kg}$$

Tram 6

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 956 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.448 \text{ kg}$$

Tram 7

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 974 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.466 \text{ kg}$$

Tram 8

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 998 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.490 \text{ kg}$$

Tram 9

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 1.027 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega jàssera entresòl: } 1.675 \text{ (lateral)/} \\ 1.867 \text{ kg. (central)}$$

$$\text{Total: } 7.194 \text{ (ext.) / } 7.386 \text{ kg}$$

Tram 10

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 1.054 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.546 \text{ kg}$$

Tram 11

$$\text{Càrrega murs: } 22.460 \times 0,20 = 4.492 \text{ kg}$$

$$\text{Càrrega carcanyol: } \dots\dots\dots 1.067 \text{ kg}$$

$$\text{Total: } \dots\dots\dots 5.559 \text{ kg}$$