

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I
DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA

Optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura.

**Análisis de las direcciones principales identificadas por sus
líneas isostáticas.**

TESIS DOCTORAL

ROGER SEÑÍS LÓPEZ

DIRECTORES

Dr. D. RAMON SASTRE SASTRE

Dr. D. ROBERT BRUFAU NIUBÓ

Mayo de 2014

... a Nathaly.

Por todo lo que quisiera decirte y no sé cómo...

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis Directores de Tesis, los Doctores Arquitectos Ramon Sastre y Robert Brufau, a los que tanto aprecio personal y profesionalmente, por ser mis mentores y fuente de inspiración. Su tutorización, su imprescindible implicación y su excelente aportación han hecho posible que esta Tesis Doctoral sea una realidad. También, quisiera agradecerles su dedicación, durante tantos años, en mi formación académica, primero, y en mi etapa profesional posterior, estando bajo sus auspicios durante más de doce años, en los cuales tantísimo he aprendido. Su entusiasmo y dedicación por la docencia universitaria me han motivado a querer ser profesor e investigador como ellos.

También es de agradecer, en su justa medida, a Agustí Portales, Director del *Departament de Construccions Arquitectòniques II* de la UPC (CA2) de la *Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona* (EPSEB) y, particularmente, a Isabel Serrà, Jefa de la *Secció d'Estructures*, la oportunidad que me han brindado para poder realizar este trabajo de investigación desde la Escuela, a quienes he querido, y creo haber correspondido, con rigor, esfuerzo y motivación, tratando de alcanzar la máxima eficacia desde el primer momento. Es de recibo, a la vez que merecido, dar un afectuoso y cariñoso agradecimiento a todos los compañeros de la Sección y del Departamento donde imparto docencia y, con mayor intensidad, a los coordinadores de las asignaturas de Estructuras I, II y III, quienes tanto me han enseñado, pacientemente, durante estos cuatro años.

En este sentido, quisiera hacer una mención especial a Carlos Carbajal, por ser el primero en esta labor de formación, por sus conocimientos y por su constante disposición a enseñar. Mi más sincero y profundo agradecimiento hacia él. Así mismo, en el ámbito del conocimiento, agradecer al equipo de Dirección de la Escuela, con Francesc Jordana al frente, así como al resto de Profesores y Personal de Administración, las facilidades y la ayuda que me han dado, y me siguen dando a diario, para desarrollar mi actividad docente e investigadora desde la Escuela.

No quisiera dejar de mencionar a personas tan influyentes en mi vida personal y profesional como han sido Miquel Àngel Sala, Marta Pubill y Emma García durante mi etapa profesional en BOMA. Sus conocimientos en el diseño y análisis de estructuras arquitectónicas, así como su profesionalidad y dedicación han sido un referente para abordar este trabajo con el máximo rigor. En esta línea, agradecer, también, a David García, Jordi Payola y Daniel Crespo de la UPC, sus opiniones siempre constructivas durante el desarrollo de la Tesis, así como, a Rodrigo Carbajal del estudio SEED, por su colaboración, aunque puntual, pero significativa.

Por último, agradecer a mis padres, familiares, amigos, conocidos y compañeros del Máster y del Programa de Doctorado de la UPC su sacrificio y apoyo en todo momento, sin cesar en su empeño por ayudarme, y a los cuales quiero incluir en esta dedicatoria. A todos ellos, mi más afectuoso agradecimiento.

Finalmente, y por ello no menos importante, en el ámbito de la estima personal, agradecer a Nathaly su infinita paciencia, apoyo incondicional y confianza en mí desde el primer instante, dándome el ánimo y la fuerza para seguir y persistir hasta el final. Sin su personalidad y tenacidad no hubiera iniciado mi carrera docente e investigadora que tanto deseo. Gracias por enseñarme que todo es posible...

Roger Señís López

RESUMEN

El objetivo fundamental de esta Tesis es establecer un procedimiento para la optimización de mallas estructurales de acero, envolventes de edificios en altura, como tipología estructural de entramado en tubo (mallas espaciales), dado el creciente interés en esta tendencia constructivo-arquitectónica. Para ello, se realiza un estudio comparativo estructural en base al análisis de las tensiones principales, para determinar si las mallas espaciales, envolventes de edificios en altura, son más óptimas y eficientes cuando su diseño se adapta a las direcciones de las tensiones principales y, en definitiva, a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos estructurales de alma llena equivalentes, bajo las acciones solicitantes.

Este enfoque requiere que previamente se establezca la relación fundamental que conforman los conceptos básicos **geometría, forma y función estructural**. Concepción, ésta, que se aborda de forma amplia en el capítulo 1, para constituir un estado del conocimiento historicista de acuerdo a su utilización en el diseño y el análisis de proyectos arquitectónicos, en base a una exhaustiva recopilación documental que se inicia en la búsqueda de la comprensión estructural. La cual permite establecer inicialmente un hilo conceptual básicamente histórico que en el transcurso de su evolución vaya desgranando las distintas vertientes formales de dicha relación función-forma.

En el capítulo 2 se aborda un estudio comparativo básico, en dos dimensiones, de distintas triangulaciones de vigas de celosía planas, para determinar la relación entre su eficiencia estructural y la disposición de las barras que conforman el entramado de las armaduras, según su adaptación a la **trayectoria de las líneas isostáticas** de los elementos resistentes de alma llena equivalentes, previamente mencionados. El estudio básico realizado, de rendimiento y comportamiento estructural, se implementa posteriormente en el análisis de estructuras espaciales de mayor complejidad, las cuales son el objeto principal de estudio del presente trabajo de investigación.

Efectivamente, este concepto de **optimización estructural** utilizado, de acuerdo a la forma, permite abordar el estudio en edificios en altura, en base a las **mallas espaciales** como sistema resistente de entramado en tubo en el ámbito de la arquitectura, de uso asiduo como se justifica en el tercer capítulo, y se trata en el capítulo 4. Su uso se debe a las elevadas prestaciones arquitectónico-estructurales que ofrece esta tipología estructural, la cual se caracteriza por la estrecha relación del binomio que conforman el diseño arquitectónico y el concepto estructural.

En el capítulo 5, de acuerdo a los estudios comparativos estructurales finales realizados, atendiendo al proceso de optimización propuesto, se concluye con una propuesta arquitectónica que engloba el concepto de «estética estructural» que se desprende de la concepción del binomio mencionado, ampliamente utilizado en el diseño y el análisis de estructuras arquitectónicas.

En el capítulo 6, dedicado al análisis de los resultados obtenidos, se extraerán las conclusiones de los estudios comparativos realizados conforme a la eficiencia estructural. Con ello, se determinará si las mallas o estructuras de entramado en tubo mejoran su eficiencia cuando se identifican con la trayectoria de las líneas isostáticas generadas por las acciones actuantes, en el caso que se ocupa de edificios en altura, considerando la acción lateral principal en este tipo de construcción, el viento. Así mismo, en este capítulo se formulan las posibles futuras líneas de investigación que se derivan de las conclusiones expuestas.

RESUM

L'objectiu fonamental d'aquesta Tesi és establir un procediment per a la optimització de malles estructural d'acer, envolupants d'edificis en alçada, com a tipologia estructural d'entramat en tub (malles espacials), donat el creixent interès en aquesta tendència constructiu-arquitectònica. Per a això, es realitza un estudi comparatiu estructural en base a l'anàlisi de les tensions principals, per determinar si les malles espacials, envolupants d'edificis en alçada, són més òptimes i eficients quan el seu disseny s'adapta a les direccions de les tensions principals i, en definitiva, a la trajectòria de les línies isostàtiques dels elements estructurals d'ànima plena equivalents, sota les accions sol·licitants.

Aquest enfocament requereix que prèviament s'estableixi la relació fonamental que conformen el conceptes bàsics **geometria, forma i funció estructural**. Concepció, aquesta, que s'aborda de forma àmplia en el capítol 1, per a constituir un estat del coneixement historicista d'acord a la seva utilització en el disseny i l'anàlisi dels projectes arquitectònics, en base a una exhaustiva recopilació documental que s'inicia en la recerca de la comprensió estructural. La qual permet establir inicialment un fil conceptual bàsicament històric que en el transcurs de la seva evolució vagi desgranant les diferents vessants formals d'aquesta relació funció-forma.

En el capítol 2 s'aborda un estudi comparatiu bàsic, en dues dimensions, de diferents triangulacions de bigues de gelosia planes, per determinar la relació entre la seva eficiència estructural i la disposició de les barres que conformen l'entramat de les armadures, segons la seva adaptació a la **trajectòria de les línies isostàtiques** dels elements resistents d'ànima plena equivalents, prèviament esmentats. L'estudi bàsic realitzat, de rendiment i comportament estructural, s'implementa posteriorment en l'anàlisi d'estructures espacials de major complexitat, les quals són l'objecte principal d'estudi del present treball de recerca.

Efectivament, aquest concepte d'**optimització estructural** utilitzat, d'acord amb la forma, permet abordar l'estudi en edificis en alçada en base a les **malles espacials** com a sistema resistent d'entramat en tub en l'àmbit de l'arquitectura, d'ús assidu com és justifica en el tercer capítol, i es tracta en el capítol 4. El seu ús es deu a les elevades prestacions arquitectònic-estructurals que ofereix aquesta tipologia estructural, la qual es caracteritza per l'estreta relació del binomi que conformen el disseny arquitectònic i el concepte estructural.

En el capítol 5, d'acord amb els estudis comparatius estructurals finals realitzats, atenent al procés d'optimització proposat, es conclou amb una proposta arquitectònica que engloba el concepte de «estètica estructural» que es desprèn de la concepció del binomi mencionat, àmpliament utilitzat en el disseny i l'anàlisi d'estructures arquitectòniques.

En el capítol 6, dedicat a l'anàlisi dels resultats obtinguts, s'extrauran les conclusions dels estudis comparatius realitzats d'acord amb l'eficiència estructural. Amb això, es determinarà si les malles o estructures d'entramat en tub milloren la seva eficiència quan s'identifiquen amb la trajectòria de les línies isostàtiques generades per les accions actuant, en el cas que s'ocupa d'edificis en alçada, considerant l'acció lateral principal en aquest tipus de construcció, el vent. Així mateix, en aquesta capítol es formulen les possibles línies d'investigació que es deriven de les conclusions exposades.

ABSTRACT

The Dissertation's main aim is to establish a procedure for the optimization of space grid as a framed tube (spatial mesh) structural typology envelope for tall buildings given the increasing interest in this recent constructive and architectural trend. As to accomplish this aim, a comparative structural study is driven, rooted in the analysis of the principal stresses, to determine whether spatial mesh envelopes for tall buildings are more optimal and efficient if their design is adapted to the principal stress directions. Thus, meaning when the design of this structural typology is based on the isostatic lines of their equivalent continuous structural elements according to their solicitations.

This approach requires to establish, previously, the fundamental relationship formed by the basic concepts of **geometry, shape and structural function**. The first chapter, therefore, is a deep overview of these concepts. The chapter outlines the historical knowledge to determine the state-of-the-art according to their use in the design and analysis of architectural projects, based on a documentary compilation in which the baseline is to seek of understanding structural. Hence, allowing to establish a basic historical conceptual thread that in the course of its evolution shells the various formal aspects of the function-form relationship.

In chapter 2, a basic comparative study is performed, in two dimensions, around different triangulations of lattice girder to determine the relationship between structural efficiency and the arrangement of the bars that make up the trusses, as adapted to the **isostatic lines trajectory** of their equivalent continuous structural elements, previously mentioned. The basic study, around efficiency and structural behavior, is implemented later in the analysis of more complex spatial structures, which are the main object of this research.

Matter of factly, this concept of **structural optimization**, used according to the form, allows this research to address the study of skyscrapers based on **spatial mesh** as a framed tube resistant system in the field of architecture. As justified in the third chapter and more thoroughly discussed in chapter 4 this current trend is frequently used. Its use is due to the high architectural and structural features offered by this structural type, which is characterized by the close relationship of the binomial that conform the architectural design and structural concept.

In chapter 5, a proposal is outlined according to the final structural comparative studies, by presenting an architectural proposal that includes the so-called concept "structural aesthetics" that emerges from the binary concept previously mentioned, which is widely used in the design and analysis of architectural structures.

Chapter 6 is devoted to the analysis of the data, the findings of the comparative studies conducted, in accordance with the structural efficiency, are presented. These results will determine if the mesh or framed tube structures are more efficient if they adopt the isostatic lines trajectory generated by the main and dominant lateral load, in the high-rise buildings case, the wind. Conjointly, in this chapter the possible future research lines derived from the above conclusions are outlined.

ÍNDICE

Capítulo 1	Introducción y planteamiento. La relación entre la forma y la función estructural	1
1.1	Antecedentes y justificación	1
1.2	Planteamiento, contenido del documento y exposición de objetivos	9
1.3	Geometría, forma y función estructural	11
1.4	La búsqueda de la comprensión estructural	15
1.5	La inversión catenária	39
1.5.1	La catenaria	39
1.5.2	El arco catenário. El principio de la inversión	41
1.5.3	Arcos, bóvedas y cúpulas. La línea de presiones y la línea de empujes	52
1.6	Teoría de las estructuras de entramados triangulares	61
1.7	La Estática Gráfica	74
1.7.1	Antecedentes históricos de la Estática Gráfica	78
1.7.2	Polígono funicular	90
1.7.3	El diagrama de esfuerzos de Cremona-Maxwell o <i>método de los nudos</i>	90
1.7.4	El método Ritter o <i>método de las secciones</i>	91
1.7.5	El método de Culmann	92
1.7.6	Aplicaciones de la Estática Gráfica. Estudios del comportamiento estructural con modelos grafostáticos	93
1.8	Las tensiones principales y las líneas isostáticas	101
1.8.1	Direcciones de las tensiones principales	101
1.8.2	Las líneas isostáticas	105
1.8.3	Teoría del círculo de Mohr	108

1.8.4	Estudio de las direcciones de las tensiones principales y de las líneas isostáticas en elementos estructurales tipo viga.....	115
1.9	La búsqueda de estructuras que se basan en la identificación de las direcciones principales.....	117
1.10	Referencias arquitectónicas que basan su diseño en la función resistente de la forma....	131
Capítulo 2 Contribución al análisis: estudio comparativo del rendimiento estructural de vigas de celosía planas según su geometría, en base a las direcciones principales identificadas por sus líneas isostáticas 143		
2.1	Objetivos del estudio comparativo del rendimiento estructural de vigas de celosía planas según su geometría	153
2.1.1	Objetivos generales del estudio comparativo de vigas de celosía planas	153
2.1.2	Objetivos específicos del estudio comparativo de vigas de celosía planas	154
2.2	La viga de celosía como tipología estructural de grandes luces	155
2.2.1	Teoría general de las vigas de celosía o armaduras planas.....	158
2.2.2	Clasificación de las vigas de celosía planas según la triangulación y la geometría	163
2.2.3	Aplicaciones y otras formas de las vigas de celosía planas.....	169
2.3	Influencia de la forma y la geometría en la eficiencia y la rigidez de estructuras trianguladas.....	171
2.4	Planteamiento y metodología de análisis del rendimiento estructural de vigas de celosía planas	175
2.4.1	Bases de cálculo	178
2.4.2	Predimensionado de las barras de las vigas de celosía	181
2.4.3	Cálculo de esfuerzos y criterios de dimensionado.....	184
2.4.4	Evaluación del rendimiento estructural	185

2.5	Estudios comparativos de vigas en celosía planas en base a los distintos parámetros de diseño, y según las líneas isostáticas	187
2.5.1	Estudio comparativo básico inicial.....	187
2.5.2	Estudio comparativo final 1: deformaciones máximas igualando los perfiles de todas las tipologías para un mismo estado de cargas.....	200
2.5.3	Estudio comparativo final 2: peso propio celosías analizadas para una misma limitación de deformación.....	215
2.5.4	Estudio comparativo final 3: peso propio celosías para «resistencia equivalente» de todas las barras.....	229
2.6	Resultados, evaluación y conclusiones finales correspondientes del rendimiento estructural de vigas de celosía planas	233
2.7	Aplicación de los resultados obtenidos a estructuras de entramado espaciales	238
Capítulo 3 Las mallas espaciales como sistema estructural en la arquitectura		241
3.1	Las estructuras espaciales	247
3.1.1	Concepto y características de estructuras espaciales	247
3.1.2	Las mallas espaciales como elemento estructural	250
3.1.3	Evolución histórica de las mallas espaciales en la arquitectura.....	251
3.2	Las mallas espaciales en la arquitectura como sistema estructural de torres y edificios en altura	264
Capítulo 4 Contribución a la clasificación y al análisis de edificios en altura. Evolución histórica, formal y estructural		269
4.1	Evolución histórica de los edificios en altura. Concepto de esbeltez	277
4.2	Evolución formal de los edificios en altura contemporáneos	289
4.2.1	El Periodo Funcional	293
4.2.2	El Periodo Ecléctico (Periodo Historicista).....	296
4.2.3	El Tercer Periodo (Estilo Internacional).....	299

4.2.4	El Cuarto Periodo (el Postmodernismo).....	302
4.2.5	La carrera por la construcción de los edificios de mayor altura	304
4.3	Evolución estructural de los edificios en altura contemporáneos.....	309
4.3.1	Clasificación de los esquemas estructurales y sistemas resistentes de edificios en altura	319
4.4	Fenómenos dinámicos en edificios: el viento y el sismo. Influencia de la forma.....	335
Capítulo 5 Contribución al formalismo: procedimiento para la optimización de mallas estructurales envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base a las direcciones principales identificadas por sus líneas isostáticas.....		339
5.1	Objetivos de los estudios comparativos del rendimiento estructural de mallas envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones.....	341
5.1.1	Objetivos generales del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura	341
5.1.2	Objetivos específicos del estudio comparativo de mallas envolventes de edificios en altura	341
5.2	Metodología de trabajo	342
5.2.1	Estudio de las direcciones de las tensiones principales y las líneas isostáticas .	343
5.2.2	Diseño de los modelos estructurales de edificios en altura	345
5.2.3	Análisis de las estructuras diseñadas	348
5.3	Bases de cálculo.....	349
5.3.1	Esbelteces geométricas de los edificios y altura entre plantas.....	349
5.3.2	Acciones consideradas y coeficientes de simultaneidad	349
5.3.3	Presiones, fuerzas y momentos del viento.....	351
5.3.4	Parámetros, coeficientes y modelización del viento.....	353
5.3.5	Método simplificado y efectos dinámicos del exceso de esbeltez.....	355

5.3.6	Combinación de acciones	359
5.3.7	Limitaciones de desplazamientos	359
5.3.8	Perfiles utilizados	360
5.4	Análisis de los modelos	361
5.4.1	Análisis multimodal espectral no lineal P-Delta (P- Δ) y factor de magnificación del momento de vuelco.....	361
5.4.2	Factor de Participación Modal.....	365
5.4.3	Evaluación del rendimiento estructural global	365
5.5	Estudios básicos previos de geometrías de malla con modelos 2D	367
5.5.1	Estudio comparativo de mallas según la inclinación de las barras	367
5.5.2	Estudio comparativo de mallas según su geometría base	370
5.5.3	Conclusiones estudios comparativos básicos de mallas	382
5.6	Estudios comparativos de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura	383
5.6.1	Estudio comparativo para la optimización de mallas envolventes de edificios en altura en base a las líneas isostáticas	383
5.6.2	Optimización de las mallas más eficientes y propuesta de diseño de edificios en altura	406
Capítulo 6	Conclusiones y perspectivas de desarrollo	417
6.1	Conclusiones.....	417
6.1.1	Conclusiones parciales	417
6.1.2	Conclusiones finales	423
6.2	Perspectivas de desarrollo.....	426
6.2.1	Estudio del comportamiento estructural frente a acciones sísmicas en base a la geometría propuesta.....	426

6.2.2	Comportamiento y eficiencia estructural de edificios en altura con pantallas de cortante	427
6.2.3	Estudio aerodinámica de edificios de mayor altura («Super-altos» o «Mega-altos»)	427
6.2.4	Influencia en el coste económico de la geometría de la estructura mallada propuesta.....	427
6.2.5	Programación de nuevas herramientas paramétricas	428
6.2.6	Influencia de la geometría propuesta en la base y la cimentación con respecto a las geometrías convencionales.....	428
Capítulo 7	Bibliografía	429