Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

ANÁLISIS INTEGRAL DE ALTERNATIVAS DE HORMIGÓN *IN SITU* PARA CUBIERTAS DE PARKING.

Autor/a

Eduard Sureda Soley

Tutor/a

Albert De La Fuente Antequera

Departament

Ingeniería de la Construcción

Intensificació

Tecnología y Construcción de Estructuras

Data

Enero 2013

Análisis integral de alternativas de hormigón *in situ* para cubiertas de parking

Autor: Eduard Sureda Soley
Tutor: Albert De La Fuente Antequera

Actualmente es posible elegir entre un abanico de alternativas amplio para la ejecución de forjados de hormigón *in situ*. En este sentido, en base a la experiencia y a los estudios desarrollados hasta la fecha, la elección adecuada del tipo de forjado en cada caso condicionará la correcta ejecución del mismo así como garantizará su rentabilidad asociada.

Las soluciones *in situ* presentan varias ventajas desde los puntos de vista del diseño y de la propia ejecución. Entre éstos, se destaca que pueden proyectarse sin las limitaciones geométricas que presentan los elementos prefabricados y que, además, trabajan a flexión en las dos direcciones del plano que los contiene. Es por ello que en este trabajo se pretende abordar, con una perspectiva amplia, un análisis orientado a esta tipología de forjados.

Tras abordar un estudio del estado del arte de esta tecnología, en este trabajo se pretende desarrollar una herramienta útil para fijar la solución óptima de forjado desde un punto de vista de la sostenibilidad. Para alcanzar este fin, se ha recurrido al método de análisis de valor integrado MIVES, que considera la importancia relativa que tienen unos requerimientos sobre otros y permite obtener un resultado fiable para poder tomar la decisión adecuada.

Con este objetivo se ha llevado a cabo el análisis estructural de más de 100 soluciones alternativas cuyas variables han sido los parámetros estructurales de diseño típicos de un forjado, como la luz, las cargas y los espesores.

En aras de acotar las múltiples alternativas, se ha llevado a cabo un primer filtrado basándose en el primero de los requerimientos del análisis de sensibilidad, el económico. Esto ha permitido descartar opciones con la finalidad de centrar el análisis de sostenibilidad en las alternativas económicamente más viables.

Se han elegido las alternativas más óptimas desde la sostenibilidad para, posteriormente, ofrecer unos rangos adecuados de uso para luces y cargas variadas.

Asimismo, esta tesina trata de conjugar la experiencia y los datos recabados durante el análisis estructural y económico, dando a conocer parte del potencial de las herramientas de evaluación de la sostenibilidad de alternativas para la elección de soluciones cada vez mejores desde más puntos de vista.

Comprehensive analysis of *in situ* concrete alternatives for parking slabs

Author: Eduard Sureda Soley
Tutors: Albert De La Fuente Antequera

Nowadays it is possible to choose between a wide variety of alternatives for the execution of concrete slabs *in situ*. In this sense, based on experience and studies developed to date, the appropriate choice of the kind of slab in each case will determine its proper execution as well as guarantees its associated profitability.

In situ solutions present several advantages from the viewpoints of design and execution itself. Between these, it stands out that they can be projected without geometric limitations that prefabricated elements present and, moreover, they work by flexion in both directions of the plane containing them. That is why this project aims to deal, from a broad perspective, an analysis guided to that type of slabs.

After undertaking a study of the state of the art of this technology, this project attempts to develop a useful tool to determine the optimal slab solution from a sustainable point of view. To this end, it has resorted to the valuation method, MIVES, which considers the relative importance that some requirements have over others and allows obtaining a real and reliable result to make the right decision.

With this aim, it has been carried out a structural analysis with more than 100 alternative solutions whose variables have been the typical design structural parameters of a slab, as light, charges and thickness.

In order to enclose the multiple alternatives, a first filtering has been carried out on the basis of the first requirement of the sensitivity analysis, the economic one. This has allowed ruling out options with the purpose of focusing the sustainability analysis in the economically most viable alternatives.

Best alternatives have been chosen from sustainability to later provide suitable ranges of use for lights and varying loads.

Additionally, this dissertation tries to combine the experience and data collected during structural and economic analysis, revealing some of the potential tools to evaluate the sustainability of alternatives to choose better solutions from more points of view.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 1

1.1 INTRODUCCIÓN 1
1.2 OBJETIVOS 2
1.3 METODOLOGÍA 2

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE 5

2.1 INTRODUCCIÓN 5
2.2 DEFINICIÓN DE FORJADO 5
2.3 FUNCIONES DE LOS FORJADOS 5
2.4 TIPOS DE FORJADOS 7
2.5 PREMISAS PARA LA ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE FORJADO 9
2.6 LOS FORJADOS IN SITU 10
2.6.1 Introducción 10
2.6.2 Losa maciza de hormigón armado bidireccional 10
2.6.3 Losa reticular bidireccional o aligerada con casetones bidireccional 12
2.6.4 Losa maciza de hormigón pretensado bidireccional 14

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL 24

3.1 INTRODUCCIÓN 24
3.2. PARÁMETROS E HIPÓTEIS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL 24
3.3 COMPROBACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE SEGÚN EHE-08 30
3.3.1 Comprobación de Estados Límite para el forjado de HP 31
3.3.2 Comprobación de los Estados Límite para los forjados HA y reticulares 32
3.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL 33
3.5. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL 40

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL ANÁLISIS INTEGRAL 43

4.1 INTRODUCCIÓN 43
4.2 ESTABLECIMIENTO DEL ÁRBOL DE TOMA DE DECISIONES 43
4.2.1. Criterio económico 44
4.2.2. Criterio social 51
4.2.3. Criterio ambiental 58
4.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN MIVES 65
4.3.1 Estructuración del modelo jerárquico 66
4.3.2 Emisión de los juicios y las evaluaciones 66
4.3.3 Desarrollo del vector de prioridad global 68

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS 70

5.1 INTRODUCCIÓN 70
5.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 70

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 90

6.1 INTRODUCCIÓN 90
6.2. CONCLUSIONES GENERALES 90
6.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS 91
6.3.1. Conclusiones respecto al análisis estructural 91
6.3.2. Conclusiones respecto al requerimiento económico 91
6.3.3. Conclusiones respecto al análisis de sostenibilidad 92
6.4 RECOMENDACIONES 92

BIBLIOGRAFÍA 94

ANEJO I

ANEJO II

ANEJO III

ANEJO IV

ANEJO V

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El forjado es el elemento estructural, generalmente horizontal, capaz de resistir las cargas que soporta y transmitirlas a los demás elementos de la estructura (vigas, pilares, muros...) hasta que llegan a la cimentación, que descansa sobre el terreno.

Durante mucho tiempo la madera fue el material predominante en la construcción de forjados; pero la aparición del hormigón y del acero supuso un gran cambio en la construcción, ya que se pudieron ampliar luces y cargas.

La tipología de forjados más utilizados en edificación de viviendas en los últimos 100 años han sido aquellos que emplean la técnica del hormigón armado. La situación económica a la que condujo la guerra civil española obligó a los ingenieros de la época a ingeniárselas para encontrar otras soluciones alternativas que demandaran menor cantidad de material, debido al elevado coste de las materias primas como el hormigón y el acero en aquella época. Aparecieron las tipologías de forjado aligerado con casetones, que reducían la cantidad de material pero demandaban una mayor cantidad de mano de obra respecto a la tipología de hormigón armado.

Debido a las limitaciones de luz y carga que presentaba el hormigón armado, a partir de la década de los 70 apareció con fuerza el hormigón pretensado. Fue en estos años cuando se redactaron en algunos países europeos normativas y recomendaciones que facilitaron la implantación de esta tipología de forjados. No obstante esta técnica aplicada a las losas de hormigón empezó a crecer en España sobre el año 2005 y hasta la actualidad.

De entre todas las soluciones posibles que uno dispone en la actualidad, se pretende obtener la óptima desde los máximos requerimientos posibles. Para ello se necesita un método de valoración que tenga en cuenta la importancia relativa que tienen unos criterios sobre otros y permita obtener un resultado fiable y real para poder tomar la decisión adecuada. Así, para este estudio se ha elegido el método basado en el programa MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible) [25]. Con este objetivo se ha llevado a cabo el análisis estructural de más de 100 soluciones

alternativas cuyas variables han sido los parámetros estructurales de diseño típicos de un forjado y las tipologías de forjados de hormigón in situ existentes en la actualidad.

1.2 OBJETIVOS

Esta tesina tiene como objetivo global proponer un conjunto de alternativas para forjados de hormigón evaluadas desde una perspectiva de la sostenibilidad que incluya requerimientos económicos, sociales y ambientales.

Para alcanzar el objetivo global de esta tesina se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis paramétrico, tratando de abarcar el mayor rango de soluciones para forjados de hormigón.

- Ofrecer unos ábacos de prediseño en base a los resultados obtenidos en el análisis estructural y usar las cuantías de armadura para dar un paso adelante en la consecución del objetivo global, tratando de dar unas primeras orientaciones.

- Evaluar económicamente las alternativas analizadas y escoger las más adecuadas desde este punto de vista.

- Analizar, a nivel de sostenibilidad, las alternativas más económicas desde los puntos de vista económico, social y ambiental.

- Presentar los resultados obtenidos en el análisis de sostenibilidad.

- Valorar los resultados obtenidos desde el análisis estructural hasta el análisis multicriterio y ofrecer las conclusiones finales.

- Contribuir con unas líneas de futuro a un análisis de sensibilidad de los pesos asociados al método MIVES y a un estudio de los requerimientos que serían aplicables a largo plazo para obtener unos rangos de soluciones óptimas considerando el factor tiempo.

1.3 METODOLOGÍA

Para la consecución de estos objetivos, la metodología seguida ha sido la siguiente:

En primer lugar, se efectuó una recopilación de información sobre las tipologías de forjados existentes y que pueden usarse en esta tesina, leyendo otras tesinas de especialidad, revistas y todo tipo de documentación.

Al mismo tiempo, se mantuvieron reuniones con el tutor responsable del estudio con el fin de decidir cuál sería el método de análisis integral adoptado y cómo se expresarían los resultados obtenidos.

El desarrollo de la presente tesina se ha estructurado en seis capítulos, referencias bibliográficas y anexos, organizados de acuerdo al desarrollo de los objetivos y el alcance de la investigación:

- En el Capítulo 1 se exponen los objetivos que se persiguen en el presente estudio y la metodología que se lleva a cabo para conseguirlo.

- En el Capítulo 2 se hace un estudio de la situación actual de los forjados de hormigón armado y hormigón pretensado, planteando un estado del arte general sobre esta tipología. Se detallan sus funciones, tipos y características, así como su rango de aplicación.

- En el Capítulo 3 se definen los parámetros estructurales de diseño y las hipótesis del análisis estructural para seguir con la comprobación de los distintos Estados Límite según EHE-08 [8], pasando por la descripción de los modelos de cálculo empleados. Con el fin de alcanzar el objetivo global de la tesina, en este capítulo se ofrecerán unos rangos aproximados y a falta del análisis de sostenibilidad, de las soluciones de forjados in situ más óptimas en base a sus cuantías de armadura.

- En el Capítulo 4 se presenta la metodología MIVES de análisis integral que se va a desarrollar en este estudio y se aplica una evaluación económica a las múltiples soluciones, considerando el coste asociado a cada una de ellas, para acotarlas de caras al análisis multicriterio y permitir avanzar un poco más en la consecución del objetivo principal.

- En el Capítulo 5 se desarrolla la metodología de análisis integral expuesta en el capítulo precedente, se exponen los resultados obtenidos y se realiza un análisis.

- En el Capítulo 6 se valoran globalmente los resultados obtenidos durante la realización de la tesina y se finaliza con las conclusiones y sugerencias de futuros estudios.

Asimismo este trabajo finaliza con la redacción e inclusión de 5 anexos en los que se recoge: (1) ábacos de prediseño; (2) reports del programa de cálculo de hormigón pretensado; (3) hojas de cálculo de las tipologías de hormigón armado y postesado; (4) hojas de cálculo de la tipología reticular y (5) costes económicos asociados a las múltiples alternativas.

CAPÍTULO 2.

ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

El título de esta tesina es: 'Análisis integral de alternativas de hormigón in situ para cubiertas de parking'. Se entiende que puede ser extensible a todo tipo de estructuras que funcionen como lo que se conoce como 'forjado ejecutado in situ' en el sector de la edificación. No se contemplan tableros de puente por ejemplo.

Por lo tanto, de ahora en adelante se hará siempre referencia a forjados. Para poder seguir adelante con el capítulo 2, se debe definir qué es un forjado.

2.2 DEFINICIÓN DE FORJADO

Debido a que pueden estar formados por elementos muy distintos y tener unas geometrías completamente diferentes, se define el concepto de forjado haciendo referencia a como lo define el profesor José Calavera [1].

Según el profesor J. Calavera (2002), *"un forjado es un elemento estructural, generalmente horizontal, aunque puede estar inclinado como sucede en ciertas cubiertas, que recibe las cargas y transmite a los restantes elementos de la estructura. Adicionalmente, el forjado materializa la separación ente plantas consecutivas y desempeña otras funciones como aislamiento entre plantas y soporte de acabados e instalaciones.*

2.3 FUNCIONES DE LOS FORJADOS

Las principales funciones de un forjado se indican a continuación (ver figura 2.1) [2]:

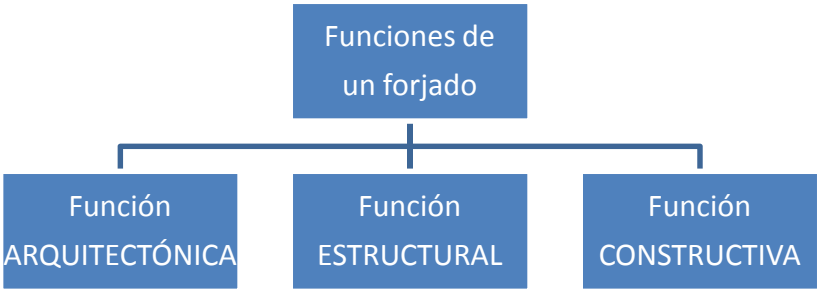

Figura 2.1. Funciones de un forjado

Función arquitectónica: El forjado divide el espacio vertical en subespacios generando diversos planos de utilización.

Función estructural: Al forjado como elemento estructural le corresponde una serie de funciones resistentes:

- Soportar las cargas correspondientes a su uso con su correspondiente factor de seguridad. Se engloban las debidas al peso propio, a las cargas permanentes y a las sobrecargas de uso. Los forjados deben proyectarse y construirse de manera que su seguridad ante los estados límite no sea inferior a la establecida en cada caso a la norma correspondiente. Es decir, el efecto de las acciones exteriores, debidamente ponderadas, sea inferior a la respuesta en cada uno de los estados límites.
- Recoger y distribuir entre los soportes las fuerzas que actúan en dirección normal al plano medio del forjado para llevarlas finalmente hasta la cimentación y de ahí al terreno.
- Arriostrar los diferentes pórticos para que, en caso de inclinarse por efectos debidos a giros de la estructura, asientos diferenciales y corrimientos horizontales, introduzcan flexiones en los forjados que al mismo tiempo se opondrán así a que progrese el abatimiento. A través de esta flexión los forjados también colaboran en la resistencia de la estructura ante las fuerzas horizontales inducidas por el viento, los sismos y otras.
- Contribuir a la reducción de la longitud de pandeo de los pilares aportando rigidez horizontal.
- Ayudar a las vigas a soportar sus torsiones, en caso de producirse. Las vigas de los pórticos pueden sufrir torsiones como consecuencia de giros según su propio eje impuestos a sus secciones extremas o por excentricidad de las cargas. El giro de las vigas torsionadas produce flexiones en los forjados empotrados en ellas, los cuales al resistirse a ser deformados incorporan su rigidez a flexión a la rigidez a torsión de las vigas, llegando a contener la progresión de dichos giros.

Función constructiva:

1. El forjado debe proporcionar un aislamiento acústico suficiente entre plantas consecutivas limitando adecuadamente la transición de los sonidos entre ellas y amortiguando los ruidos de los impactos que actúen sobre los forjados.
2. El forjado debe proporcional un aislamiento térmico para lograr un ahorro energético, garantizar el confort térmico de los usuarios y mejorar la durabilidad del edificio.

3. El forjado debe ser capaz de impedir la propagación del fuego a través. Su principal misión es controlar el fuego en sectores de incendio configurados por elementos constructivos para permitir la evacuación. Se establece el comportamiento ante el fuego de materiales y elementos constructivos. El comportamiento ante el fuego de los elementos se caracteriza por el tiempo durante el cual dicho elemento mantiene:

    a. Estabilidad o capacidad portante
    b. Ausencia de emisión de gases en la cara no expuesta
    c. Estanqueidad al paso de llamas o gases calientes
    d. Resistencia térmica suficiente para impedir que se produzcan en la cara no expuesta temperaturas superiores a las que se establecen en la norma UNE 23.093.

4. En algunos casos es conveniente que le forjado sea lo más impermeable posible en previsión de fallos de la impermeabilización.
5. El forjado debe actuar como soporte de pavimento o de la cobertura.
6. El forjado puede definir el techo o soportar al falso techo.
7. El forjado puede albergar instalaciones.

2.4 TIPOS DE FORJADOS

Se puede clasificar los forjados desde varios puntos de vista. En esta tesina se clasifican en función de:

- Forma de transmisión de cargas
- Método constructivo

Clasificación de los forjados según la forma de transmisión de cargas [3]

- <u>Forjados unidireccionales</u>: transmiten las cargas a los apoyos en una sola dirección (ver figura 2.2)

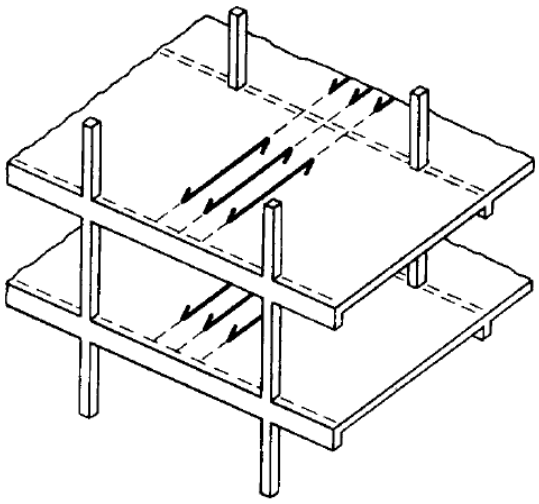

Figura 2.2. Esquema de la dirección de las cargas en un forjado unidireccional

- Forjados bidireccionales: transmiten las cargas a los apoyos en dos direcciones principales, generalmente ortogonales (ver figura 2.3).

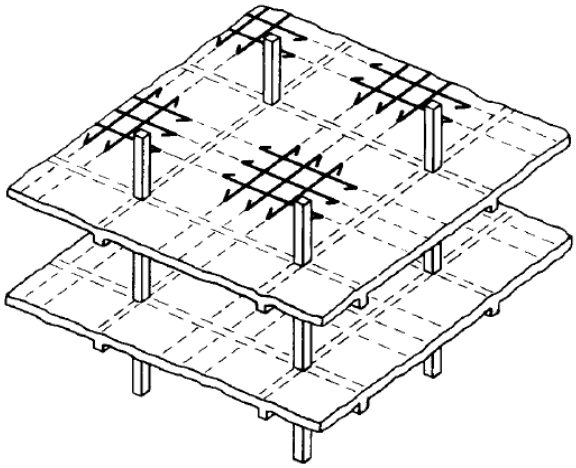

Figura 2.3. Esquema de la dirección de las cargas en un forjado bidireccional

Para esta tesina sólo consideraremos los bidireccionales, por tratarse de los más comúnmente usados hoy en día para forjados de edificación y ser los que permiten mayores luces y cargas.

Clasificación de los forjados según su método constructivo:

- Forjados prefabricados: Están constituidos por piezas prefabricadas autorresistentes, es decir capaces de resistir por si solas la totalidad de esfuerzos a los que estará sometido el forjado. Los espacios que quedan entre las distintas piezas prefabricadas, una vez colocadas en su posición definitiva, se rellenan con hormigón para conseguir una cierta continuidad transversal. La mayoría de los forjados prefabricados trabajan de forma unidireccional.

  Las mayores ventajas son la sencillez y rapidez constructiva, reduciendo a un mínimo de operaciones a realizar en obra. El fabricante ofrece además una calidad garantizada por él mismo.

  Los mayores inconvenientes son el reducido monolitismo resultante y su pequeña rigidez transversal; por lo que deben buscarse otras alternativas de forjado cuando estos factores sean fundamentales para el arriostramiento de pórticos y para absorción de fuerzas horizontales.

  Los principales tipos son los de viguetas con pieza de entrevigado (pueden ser losas prefabricadas) y los de piezas de mayor anchura como las losas alveolares (ver ilustración 2.1)

Ilustración 2.1. Forjado prefabricado con losas alveolares

- Forjados in situ: Se trata de losas de hormigón ejecutadas 'in situ', como su nombre indica.

  Las mayores ventajas son que se pueden proyectar libremente, sin la limitación que presentan los elementos prefabricados; por lo tanto es el forjado de elección para grandes luces y cargas. La otra ventaja es la de poder trabajar a flexión en más de una dirección.

  Los principales tipos son la losa maciza de hormigón, que puede ser armada o pretensada, y las losas reticulares. Estas últimas, a igualdad de canto h, consumen menos hormigón que las losas macizas por la presencia de los aligeramientos. El inconveniente es que necesitan de más mano de obra para su ejecución. Todos los tipos de forjado in situ pueden trabajar de forma bidireccional, que es la tipología de forjado elegida para esta tesina.

2.5 PREMISAS PARA LA ELECCIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE FORJADO

A pesar de que uno de los objetivos finales de esta tesina es la de elegir la solución óptima de forjado desde los puntos de vista económico, social y ambiental, en este apartado se comentan unas consideraciones a tener en cuenta para la elección de la tipología de forjado.

- Coste de los posibles sistemas con el objetivo de elegir el más económico.
- Magnitud de luces y cargas.
- Relación entre luces de los vanos en direcciones X e Y, seleccionando soluciones bidireccionales (relaciones cercanas a 1) o unidireccionales. Para simplificar el cálculo, hemos considerado para esta tesina relaciones iguales a 1 para todas las tipologías de estudio.
- Altura total del forjado estructural: determina la altura total del edificio (importante en edificios en altura).

- Constructibilidad: acceso de grúas, costo de encofrado y cantidad de puestas, utilización de mesas, vinculación a elementos construidos con anterioridad, punzonamiento, posibilidad de tesar desde los bordes exteriores.
- Tipos de acabados exigidos (por ejemplo, si en los acabados interiores se exigen techos planos). Flexibilidad para el lay-out de instalaciones y/o servicios a disponer entre el forjado y el falso techo: posibilidad de disponer vigas de canto.
- Peso propio del forjado por unidad de superficie (promedio): determina el tamaño de soportes y cimentaciones, y en zona sísmica, la magnitud de la fuerza horizontal.
- Requerimientos en Estados Límite de Servicio (fisuración, deformación) y en Estados Límite Últimos (resistencia).
- Calidad posible del hormigón en función de los materiales locales y los medios de fabricación.
- Distancia a la que se encuentra la fuente de aprovisionamiento si se trata de prefabricados.
- Disponibilidad de mano de obra capacitada.
- Medios auxiliares con los que podrá contarse para la elevación, compactación, ferrallado, apuntalamiento, encofrado…
- Frecuencia previsible de la supervisión técnica de la obra.
- Nivel de control de calidad previsto, tanto de materiales como de ejecución.

2.6 LOS FORJADOS IN SITU

2.6.1 Introducción

En este apartado se profundizará en esta tipología concreta de forjado. Según se ha comentado en apartados anteriores, es la que formará parte de nuestro estudio de alternativas por tratarse de la opción mayoritariamente elegida por los proyectistas para la construcción de forjados en edificación. Destacaremos las características de cada uno de los tipos existentes, su rango de aplicación, su puesta en obra y ventajas e inconvenientes de su uso.

2.6.2 Losa maciza de hormigón armado bidireccional [3]

Las losas macizas de hormigón armado bidireccionales son estructuras superficiales, planas, donde la capacidad mecánica y resistente de la placa la asume todo el conjunto y no una parte, adquiriendo la responsabilidad de enfrentarse a los esfuerzos de flexión, torsión y cortante que se desarrollan dentro del esquema estructural. Las losas macizas, por sus condiciones de apoyo y disposición de armadura, trabajan en dos direcciones.

Salvo justificación especial, en el caso de placas de hormigón armado, el canto total de la placa no será inferior a L/32, siendo L la mayor dimensión del recuadro, según el artículo 55 de [4].

El rango de aplicación de esta tipología de forjados es para cubrir luces de unos 4-5 metros aproximadamente y cargas no demasiado elevadas [5].

Su puesta en obra es sencilla, pues destaca su gran simplicidad. Debe entablarse la superficie de la losa al completo antes de comenzar a trabajar (ver ilustración 2.2). Esta misma plataforma sirve de plataforma de trabajo a los operarios que colocan la armadura pasiva (ver ilustración 2.3) y vierten el hormigón (ver ilustración 2.4).

Ilustración 2.2. Entablado completo de la superficie para el montaje de losas macizas armadas bidireccionales

Ilustración 2.3. Montaje de la armadura pasiva en losas macizas armadas bidireccionales

Algunas de las ventajas son la sencillez y economía del encofrado, la flexibilidad en la disposición de pilares y la planeidad de los techos, que garantizan una adecuada estética y un sencillo trazado de servicios e instalaciones. La losa maciza es la solución que mejor funciona estructuralmente, puesto que tiene un comportamiento multidireccional debido a su monolitismo. Además es la solución que permite absorber mayores irregularidades en planta, ya que debido a su mayor hiperestaticidad las cargas consiguen encontrar caminos relativamente sencillos hasta los pilares. Permite por tanto diseños en planta que el resto de tipologías no soportan adecuadamente. También aportan una mayor libertad y flexibilidad de cara a modificaciones y singularidades en el proyecto. Su mayor peso y compacidad aportan una buena resistencia térmica y acústica.

Ilustración 2.4. Vertido del hormigón en losas macizas armadas bidireccionales

Como inconvenientes cabe destacar su elevado peso propio, lo que al mismo tiempo limita las luces entre apoyos y las cargas a considerar. Si se desea proyectar una solución armada con unas luces y cargas elevadas nos encontramos con una congestión de armadura pasiva sobre los apoyos, problemas de punzonamiento y, ya comentado al principio de este párrafo, un consumo excesivo de hormigón que entre otras cosas conlleva un aumento de las deformaciones. En la ilustración 2.5 puede verse el típico edificio proyectado con la técnica del hormigón armado, donde las luces no superan los 5 metros.

Ilustración 2.5. Solución final para losas macizas armadas bidireccionales

2.6.3 Losa reticular bidireccional o aligerada con casetones bidireccional [6].

Las losas aligeradas o reticulares pertenecen a la familia de las losas de hormigón armado, son no homogéneas, aligeradas y armadas en dos direcciones ortogonales configurando una placa nervada. La estructura que obtenemos así admite que sus flexiones puedan ser descompuestas y analizadas según las dos direcciones de armado y

forma, junto con los apoyos, un conjunto estructural capaz de soportar las acciones verticales repartidas y puntuales muy adecuadamente; las acciones horizontales se soportan razonablemente bien pero en una medida bastante menor que las primeras.

Salvo justificación especial, en el caso de placas de hormigón armado con aligeramientos, el canto total de la placa no será inferior a L/28, siendo L la mayor dimensión del recuadro, según el artículo 55 de [4].

La separación entre ejes de nervios no superará los 100 cm. Y el espesor de la capa superior no será inferior a 5 cm. Y deberá disponerse en la misma una armadura de reparto en malla, según el artículo 55 de [4].

Los parámetros básicos que definen las características del forjado reticular son, según el artículo 55 de [4]:

- Separación o intereje entre ejes de nervios
- Espesor de los nervios
- Altura del bloque aligerante
- Canto total de la placa
- Espesor de la capa de compresión

El rango de aplicación de esta tipología de forjados es para cubrir luces y cargas mayores que en el caso de losa maciza.

Su puesta en obra, pese a que de la misma forma que en el caso anterior debe entablarse la superficie de la losa al completo antes de comenzar a trabajar, es menos simple. Alrededor de los pilares se prescinde de los bloques de aligeramiento y la placa pasa a ser maciza, desapareciendo las nervaduras como tales. Así se define el ábaco, como la zona maciza de una losa aligerada alrededor de un apoyo (ver ilustración 2.6). En esta tesina nos centraremos en las losas reticulares sin ensanchamiento de cabezas de pilares en zonas de capiteles.

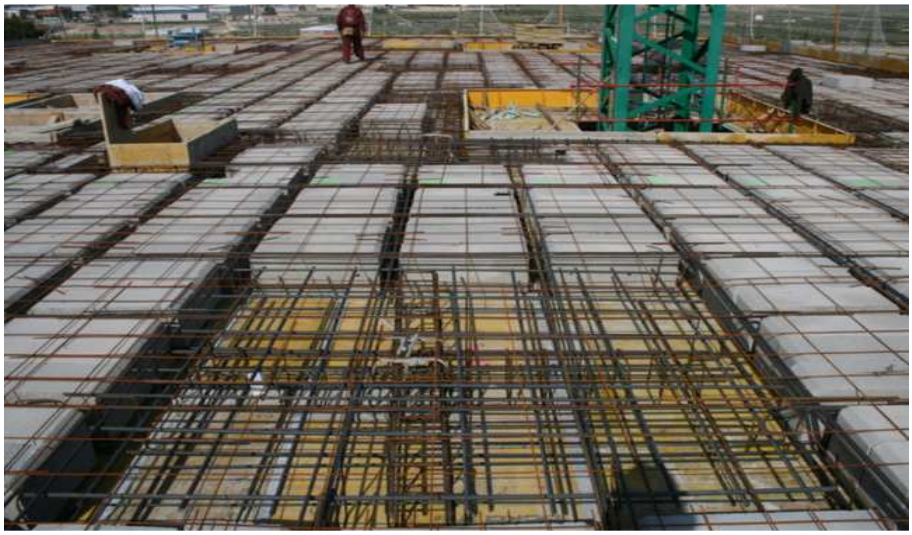

Ilustración 2.6. Vista de un ábaco sin casetones en zona de apoyo en una losa reticular bidireccional

Los aligeramientos son bloques que pueden quedarse embebidos en el hormigón y por lo tanto perderse, o bien ser recuperables. Si son del primer tipo suelen ser de

hormigón o porexpan; los aligeramientos recuperables suelen ser de plástico o metal (ver ilustración 2.7).

Ilustración 2.7. Aligeramientos recuperables de plástico en el montaje de una losa reticular bidireccional

Las ventajas que presentan las soluciones aligeradas son similares a las de las losas bidireccionales macizas, aunque ya se han comentado en el apartado de losas macizas que éstas funcionaban mejor. No obstante, a igualdad de canto, cargas y luces que la solución de losa maciza, tienen una mayor resistencia al punzonamiento y las deformaciones generadas son menores. Ello conlleva el poder abarcar mayores luces y sobrecargas a igualdad de condiciones.

Como inconvenientes de esta tipología básicamente podríamos nombrar los mencionados en el párrafo de ventajas de las losas macizas. El montaje de los aligeramientos y el armado de los capiteles y nervios es más laborioso que en la tipología anterior, por lo que se incrementa el precio por metro cuadrado del forjado. Este tipo de losas, además, deben cumplir con unos requisitos mínimos de ancho de nervio, espesor de losa y recubrimiento para garantizar el funcionamiento estructural y satisfacer, por ejemplo, las condiciones de resistencia al fuego. Se debe controlar más parámetros que en el caso de losa maciza. La ilustración 2.8 es una losa reticular terminada.

Ilustración 2.8. Solución acabada de una losa reticular bidireccional

2.6.4 Losa maciza de hormigón pretensado bidireccional

El pretensado es la aplicación controlada de unas fuerzas a las estructuras que producen tensiones, en general de signo contrario a las producidas por las restantes acciones aplicadas (ver figura 2.4), con la intención de mejorar su capacidad resistente y/o su comportamiento. Las tensiones se introducen a las estructuras mediante el tesado de cordones de acero de alta resistencia [5].

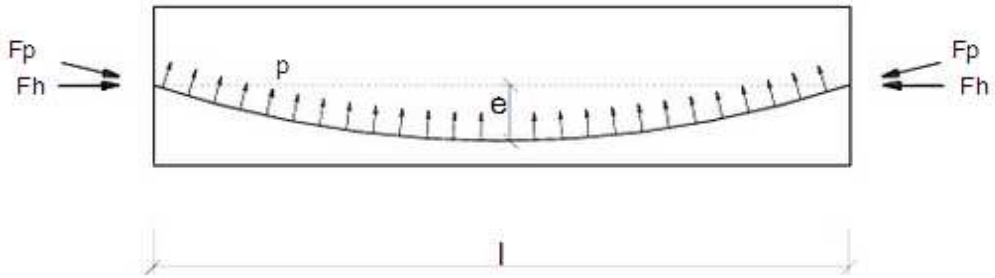

Figura 2.4. Esquema de la introducción del pretensado a un elemento resistente como un forjado o una viga

Se llama hormigón pretensado con armadura postesa o, simplemente, hormigón postesado, a aquel en el que el hormigonado se realiza antes del tesado de las armaduras activas, que normalmente se alojan en conductos o vainas. Cuando el hormigón ha adquirido suficiente resistencia se procede al tesado y anclado de las armaduras [5].

En función de la existencia o no de adherencia entre los tendones y el hormigón que lo rodea, se puede clasificar el postesado en adherente (bonded/grouted) y no adherente (unbonded). El postesado adherente es aquel en el que después del tesado de los cordones, se rellenan las vainas (o conductos que alojan los cordones) con lechada de cemento inyectada a presión. Esta inyección tiene dos objetivos fundamentales: (1) conferir la adherencia entre tendones y el hormigón y (2) proveer protección frente a la corrosión [5].

El uso del postesado en edificación en España tiene un desarrollo muy posterior respecto a su uso en puentes y obras civiles, debido a varias razones, una de las cuales es la ausencia de una normativa específica para edificación. Otra de las causas ha sido la falta de conocimiento de los sistemas de postesado específicos para edificación. Los sistemas tradicionales de postesado de obra civil agrupan los cordones en vainas de hasta 37 de 0.6”. Esto requiere el uso de dispositivos de anclaje de grandes dimensiones y de equipos de tesado e inyección muy pesados y que requieren de medios auxiliares para su movimiento dentro de obra y esto no es siempre posible en edificación. Existen sistemas y equipos diseñados para su exclusivo uso en forjados de edificación, que agrupan los cordones en unidades de hasta 4 [5].

Existen básicamente tres sistemas de postesado que se utilizan en edificación: monocordón adherente o no adherente (ver ilustraciones 2.9 y 2.10 respectivamente), el multicordón adherente con vaina plana de hasta 4 cordones (ver ilustración 2.11) y el sistema multicordón con vaina circular, ubicado principalmente en vigas de canto y losas de cimentación para edificación (ver ilustración 2.12). También existe un cuarto sistema, postesado con barras (Stressbar), que se utiliza en casos de tendones cortos y con trazado recto (ver ilustración 2.13) [5].

Ilustración 2.9. Sistema de postesado monocordón adherente en edificio de viviendas de zona Forum Barcelona

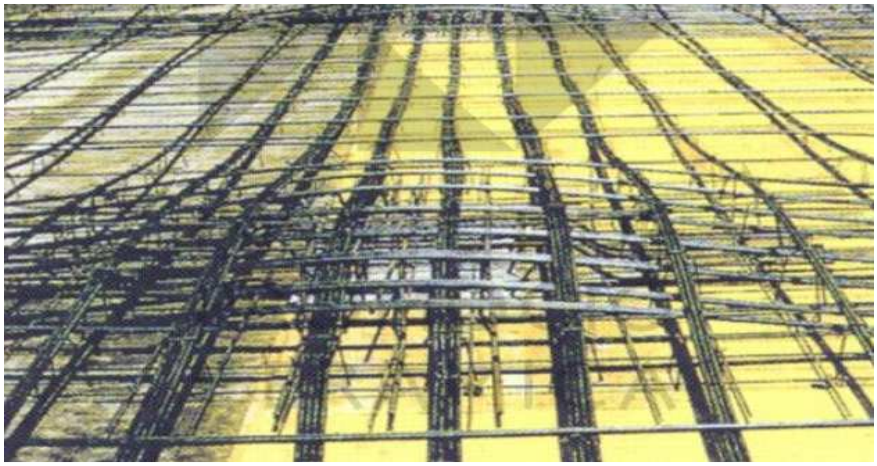

Ilustración 2.10. Sistema de postesado monocordón no adherente

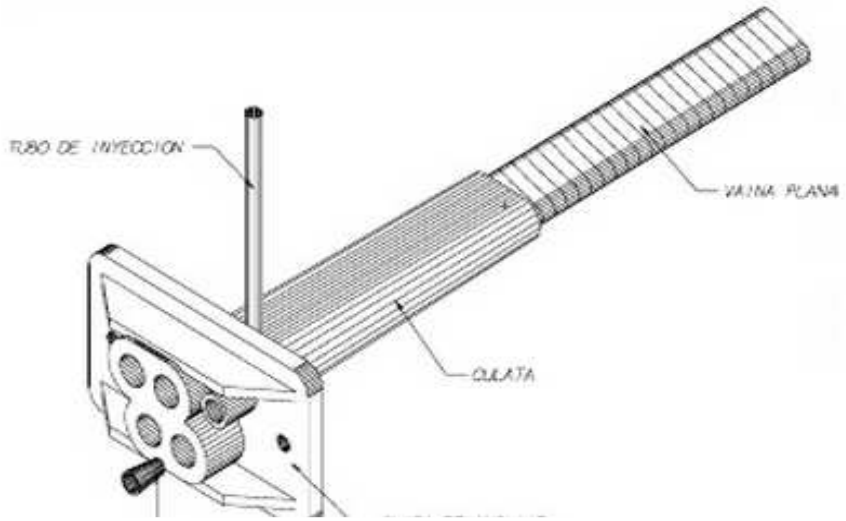

Ilustración 2.11. Sistema de postesado multicordón adherente de vaina plana de 4 cordones

Ilustración 2.12. Sistema de postesado multicordón con vaina circular para viga de canto en edificio Quirón Barcelona

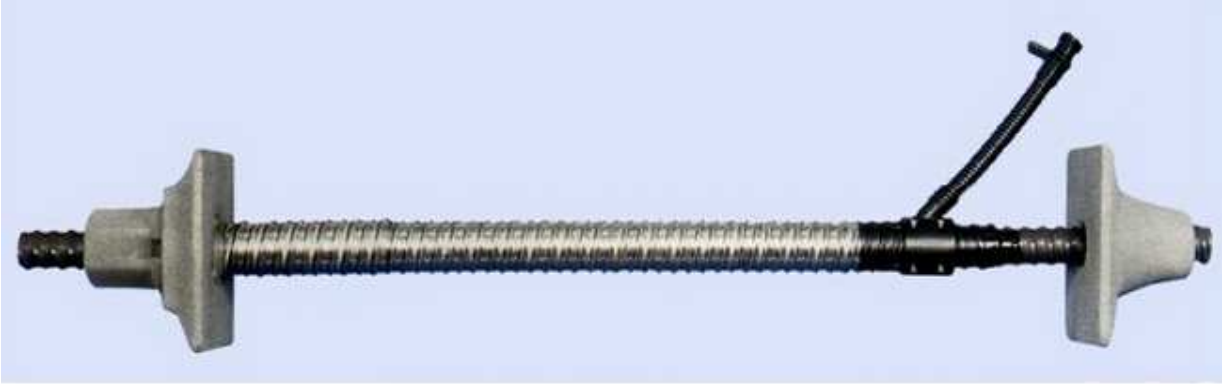

Ilustración 2.13. Sistema de postesado con barras Stressbar

Cada uno de estos sistemas está formado por los mismos componentes principales: cordones, vainas, anclajes activos, anclajes pasivos y acopladores [5].

Un tendón es el conjunto formado por los cordones dentro de la vaina junto con sus respectivos anclajes, como puede apreciarse en la figura 2.5 [5].

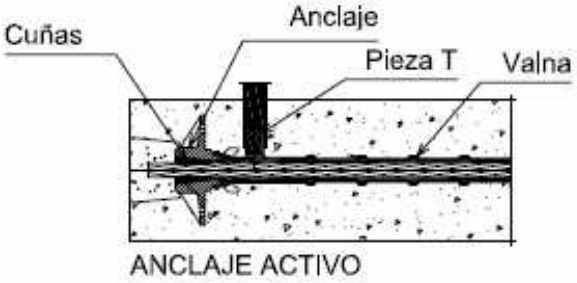

Figura 2.5. Tendón de postesado formado por anclaje, cuñas, vaina y demás accesorios

Este documento se centrará únicamente en la solución postesada con sistema monocordón adherente.

Los criterios más habituales a la hora de realizar una clasificación de losas postesadas son: la disposición en planta de la armadura activa y la forma de las losas [5].

Según la disposición en planta de la armadura activa tenemos 4 soluciones posibles [5]:

- Concentrados en dos direcciones: todos los tendones se concentran sobre pilares según dos direcciones ortogonales (ver figura 2.6). Se aprovecha la totalidad de la armadura activa frente a punzonamiento y el montaje es relativamente sencillo. No obstante, esta disposición obliga a disponer una gran cantidad de armadura pasiva en el centro del vano para transmitir las cargas desde el centro del vano hasta la línea de pilares.

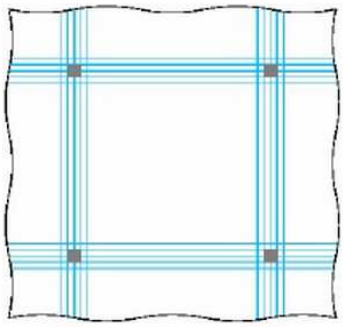

Figura 2.6. Postesado concentrado en dos direcciones

- Distribuidos en dos direcciones: Muy eficiente estructuralmente a pesar de dificultades constructivas y de no aprovechar la armadura activa frente a esfuerzos de punzonamiento. Ver figura 2.7.

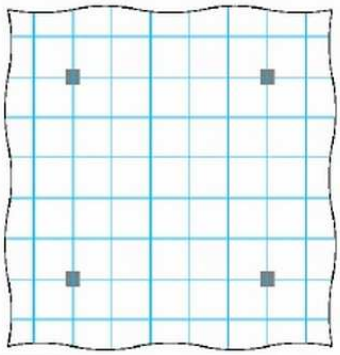

Figura 2.7. Postesado distribuido en dos direcciones

- Concentrados en una dirección y distribuidos en la otra: Reúne las virtudes de las dos soluciones anteriores. Se ha convertido en la opción más utilizada. La transferencia de cargas se realiza del centro de los vanos a los tendones repartidos uniformemente y de éstos a los tendones concentrados, quienes llevan la carga a los pilares (ver figura 2.8).

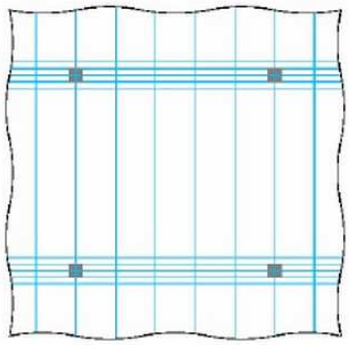

Figura 2.8. Postesado concentrado en una dirección y distribuido en la otra

- Disposiciones mixtas: consiste en concentrar la mitad de los tendones sobre pilares y distribuir los restantes uniformemente (ver figura 2.9). Se intenta conjugar la facilidad constructiva con la eficiencia estructural.

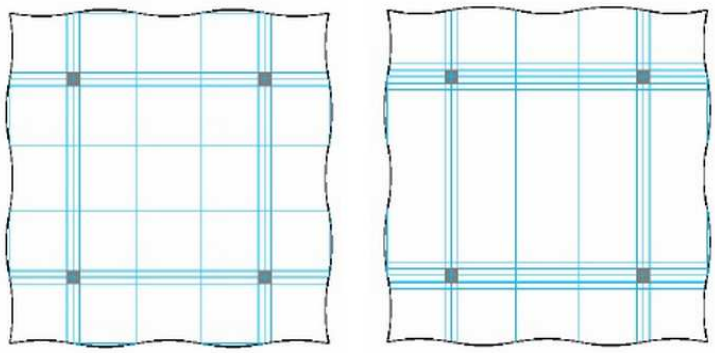

Figura 2.9. Postesado con una disposición mixta

Según la forma de las losas y dentro de los sistemas bidireccionales, ya comentado con anterioridad que son los que van a desarrollarse en la tesina, se tiene [5]:

- Losas planas: su rango de aplicación es para luces de 7 a 11 metros y para cargas no mayores a 10 KN/m (ver ilustración 2.14). La sencillez constructiva, economía del encofrado, flexibilidad en la disposición de pilares y los techos resultantes planos son las principales ventajas de esta tipología. Como desventajas tendremos problemas de punzonamiento y congestión de armadura pasiva sobre pilares a medida que aumentemos luces y cargas. Al no tener aligeramientos el consumo de hormigón será elevado en vanos grandes y por lo tanto se producirán mayores deformaciones que en otros sistemas.

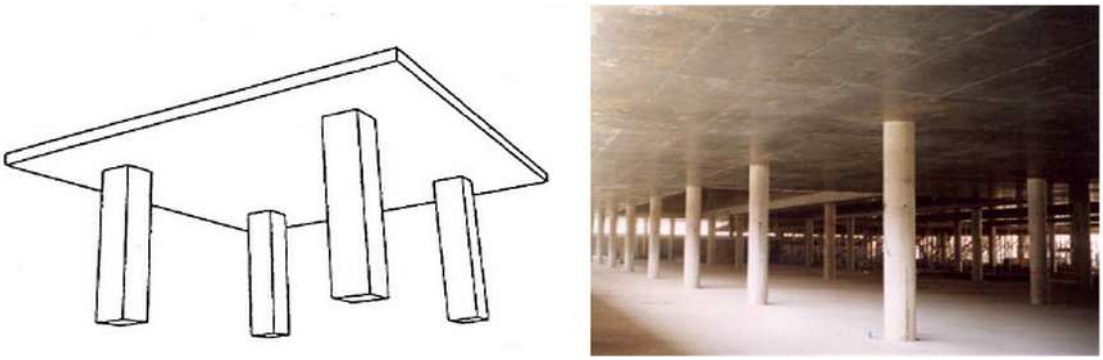

Ilustración 2.14. Losas macizas de hormigón postesado planas

- Losas con capiteles: su rango de aplicación es para luces de hasta 13 metros y cargas no mayores a 10 KN/m (ver ilustración 2.15). El aumento de la resistencia de la losa al punzonamiento es evidente, así como un menor consumo de hormigón en vanos grandes por la presencia de capiteles. Los capiteles además aumentan la capacidad resistente frente a momentos sobre pilares y por lo tanto reducen la cuantía de armadura pasiva. Como desventajas tenemos la mayor complicación de ejecución y el elevado coste del encofrado para el capitel.
-

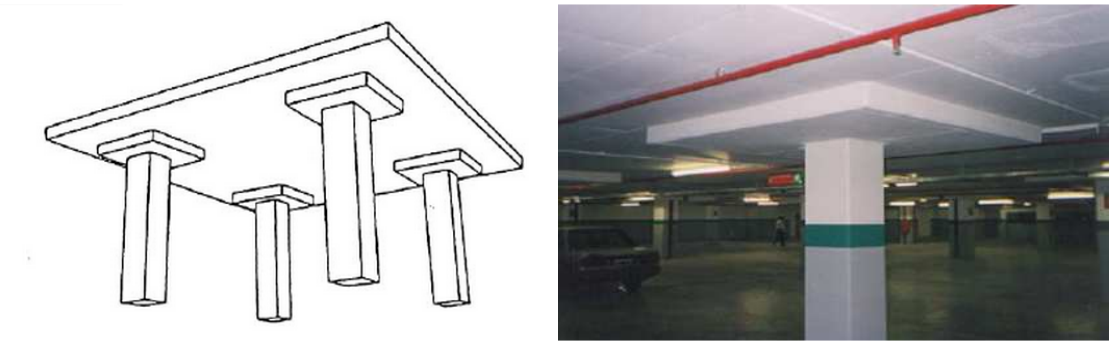

Ilustración 2.15. Losas macizas de hormigón postesado con capiteles

-
- Losas aligeradas: El rango de aplicación óptimo es para luces de unos 13 metros y cargas inferiores a 10 KN/m (ver ilustración 2.16). Las ventajas son similares a las losas planas, aunque a igualdad de canto, cargas y luces, estas losas tienen mayor resistencia al punzonamiento y deformaciones menores. El armado de los nervios posee un mayor grado de complicación, lo que encarece el precio por metro cuadrado de esta solución.
-

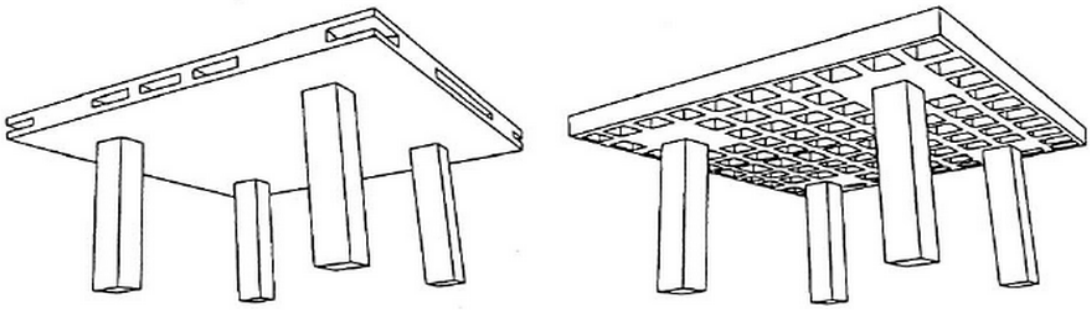

Ilustración 2.16. Losas reticulares de hormigón postesado

- Losas de vigas planas en dos direcciones: su rango de aplicación óptimo es para luces de alrededor de 15 metros y cargas mayores a 10 KN/m (ver ilustración 2.17). La capacidad de obtener grandes luces en ambas direcciones es la principal ventaja. El alto coste de encofrado y la complicación para el tendido de instalaciones son las principales desventajas.

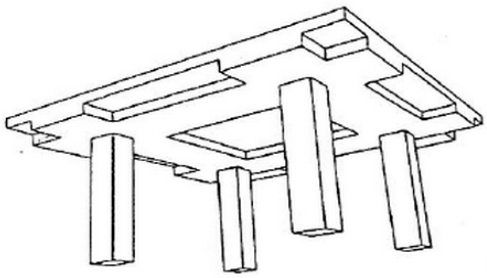

Ilustración 2.17. Losas de hormigón postesado de vigas planas en dos direcciones

- Losas de vigas de canto en dos direcciones: su rango de aplicación es para luces de alrededor de 20 m y sobrecargas muy elevadas (ver ilustración 2.18). Las ventajas son evidentes, luces muy grandes en ambas direcciones. Las desventajas son las mismas que para el caso de losas de vigas planas, empeorándose aún por la poca estética ofrecida por la solución.

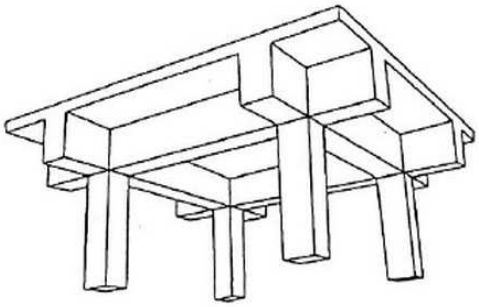

Ilustración 2.18. Losas de hormigón postesado de vigas de canto en dos direcciones

Tras la clasificación de las losas de hormigón postesado bidireccionales, se debe comentar que para esta tesina se usará la solución postesada de losa plana, por tratarse de la solución que ofrece mayores ventajas y unas luces y sobrecargas más que aceptables.

Finalmente se comentará la puesta en obra de la solución pretensada. Posiblemente se trate de la solución con una mayor velocidad de ciclo constructivo. Desde el montaje del encofrado hasta la obtención de un forjado estructuralmente resistente. La cualidad más remarcable de los forjados postesados ejecutados in situ, desde el punto de vista de la ejecución, es el hecho de poder desencofrar y, en muchos casos, poder desapuntalar totalmente el forjado después del tesado de los tendones. El tesado se realiza normalmente al cuarto día de haber hormigonado. En este momento la losa es autoportante y, en general, ya es capaz de resistir las cargas para las que ha sido diseñada. Si se emplean sistemas y medios adecuados se pueden optimizar fácilmente los recursos, consiguiendo rapidez y economía en la ejecución [5].

A modo de resumen se detallan brevemente las actuaciones con acontecen en un forjado postesado [5]:

- Acopio de todos los materiales necesarios y realización de acciones previas al montaje del forjado, como precortar los tendones a la longitud adecuada, colocación de anclajes activos y preparación de anclajes pasivos si los hubiese.

- Encofrado del forjado. Se suelen marcar encima la cantidad y cota de los tendones de postesado.
- Colocación de la armadura pasiva inferior, junto con los soportes de los tendones de postesado.
- Colocación de la armadura activa.
- Colocación de la armadura pasiva superior.
- Hormigonado del forjado y curado.
- Tesado cuando el hormigón alcanza la resistencia definida en proyecto.
- Corte de sobrelongitudes de tendones con tesados ok y sellado de cajetines.
- Descimbrado completo si se trata de un solo forjado o de una parte de la losa si se van a construir más encima. Supone una considerable ventaja económica al reducir el coste del alquiler de puntales.
- Inyección con lechada de cemento de los espacios vacíos entre vaina y cordón de acero.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de alcanzar el objetivo global de la tesina, en este capítulo se ofrecerán unos rangos aproximados y a falta del análisis de sostenibilidad, de las soluciones de forjados in situ más óptimas en base a sus cuantías de armadura.

En primer lugar se definirán los parámetros de diseño y las hipótesis del análisis estructural para seguir con la comprobación de los distintos Estados Límite [4], pasando por la descripción de los modelos de cálculo empleados.

Se presentaran los resultados obtenidos de forma clara y visual y se analizará su variación respecto de los parámetros de diseño considerados.

3.2. PARÁMETROS E HIPÓTEIS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural consiste en la determinación de los efectos originados por las acciones sobre la totalidad o parte de una estructura, con efecto de poder efectuar comprobaciones en los Estados Límite Últimos y de Servicio, según el capítulo 5 de [4].

Para la realización del análisis, se idealizará tanto la geometría de la estructura como las acciones y las condiciones de apoyo mediante unos modelos matemáticos capaces de reproducir adecuadamente el comportamiento estructural dominante.

En la tabla 3.1 se citan los materiales y los coeficientes parciales de seguridad que se han considerado para el análisis.

	Designación EHE-08	**Coeficiente de minoración**
Acero para armadura activa	Y1860 S7 Ö15,2	$\tilde{a}_s = 1.15$
Acero para armadura pasiva corrugada	B 500 S	$\tilde{a}_s = 1.15$
Hormigón para forjados de hormigón armado	HP-35/F/10/IIb	$\tilde{a}_c = 1.50$
Hormigón para forjado pretensado	HA-35/F/10/IIb	$\tilde{a}_c = 1.50$

Tabla 3.1. Características de los materiales considerados para el análisis estructural

La definición geométrica de los parámetros estructurales considerados para el diseño se presenta en la tabla 3.2.

Parámetros geométricos	
Espesor (mm)	**Luces (m)**
150	4.0
	6,4
	8.0
	12.0
200	4.0
	6,4
	8.0
	12.0
300	4.0
	6,4
	8.0
	12.0
375	4.0
	6,4
	8.0
	12.0

Tabla 3.2. Parámetros geométricos adoptados para el análisis estructural

Los elementos estructurales que se van a considerar para el análisis van a ser soportes de sección cuadrada de 600 x 600 mm y placas, macizas y aligeradas, según los requisitos de luz mínima mayor que cuatro veces el espesor medio del capítulo 5 de [4]. Se va a considerar que las placas trabajan de forma bidireccional, están empotradas en los apoyos aislados definidos en este párrafo y su canto total no deberá ser inferior a los valores siguientes [4]:

- Placas macizas de espesor constante, L/32
- Placas aligeradas de espesor constante, L/28

siendo L la mayor dimensión del recuadro.

Los valores extremos del rango de espesores y luces de la tabla 3.2 se han seleccionado en base a los requerimientos más estrictos de luz mínima según el capítulo 12 de [4].

Se pretende ofrecer unos rangos de parámetros útiles y lo suficientemente generales para que se pueda abarcar el máximo número de soluciones. Con esta finalidad se han elegido luces desde los 4 hasta los 12 metros y espesores desde los 150 hasta los 375 mm para las placas macizas de espesor constante y desde los 300 hasta los 375 mm para las placas aligeradas. Compruébese que para una luz de 4 metros el espesor mínimo según debe ser de 125 mm y que para una luz de 12 metros debe ser de 375 mm.

Según [7] la altura mínima de bloque para aligerar es de 200 mm, por lo que para cumplir con las especificaciones comentadas en el capítulo 2 de este documento para esta tipología, sólo se pueden estudiar los forjados de espesor 300 y 375 mm.

Se combinarán los espesores adecuados con todas las luces, con aras de obtener 16 soluciones de forjado para las tipologías de placa maciza (losa de hormigón armado y losa de hormigón pretensado) y 8 soluciones de forjado para la tipología de placa aligerada (losa reticular con aligeramientos).

Los valores de luz elegidos vienen motivados por la menor flexibilidad de configuración que ofrece la tipología reticular. En el siguiente párrafo se definen las características geométricas consideradas para este estudio y a continuación se justificarán los valores de luz de la tabla 3.2.

De entre las posibilidades de configuración que ofrece la tipología reticular, se han tomado unas alturas de bloques aligerados de 200 y 250 mm [7], un intereje o separación entre ejes de nervios de 800 mm y un ancho de los mismos de 160 mm (ver figuras 3.1 para el espesor de 300 mm y la figura 3.2 para el espesor de 375 mm).

Una práctica usual es dar a los ábacos de un forjado reticular unas dimensiones en planta de aproximadamente 1/5 a 1/4 de la luz del recuadro a cada lado del pilar, procurando ajustarse a la cuadrícula de nervios de intereje 800 mm [8]. En la figura 3.3 se justifica la elección del valor de luz de 6,4 metros. Para el resto de luces, se ha comprobado que satisfagan estos requerimientos geométricos.

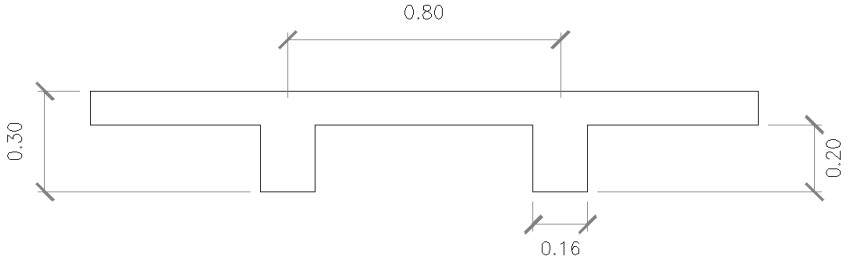

Figura 3.1. Parámetros geométricos de la tipología reticular h = 300 mm. Cotas en m

Las acciones a considerar en el proyecto de una estructura se pueden clasificar según su naturaleza y según su clasificación en el tiempo. Para este estudio, del primer tipo sólo se consideraran las acciones directas o cargas y del segundo tipo las acciones permanentes (G) i las acciones variables (Q), según el artículo 10 de [4].

Para los valores característicos de las acciones permanentes se considera el peso propio. Para los elementos de hormigón se tomaran las siguientes densidades, según el artículo 10 de [4]:

Hormigón armado y pretensado: 2500 kg/m^3

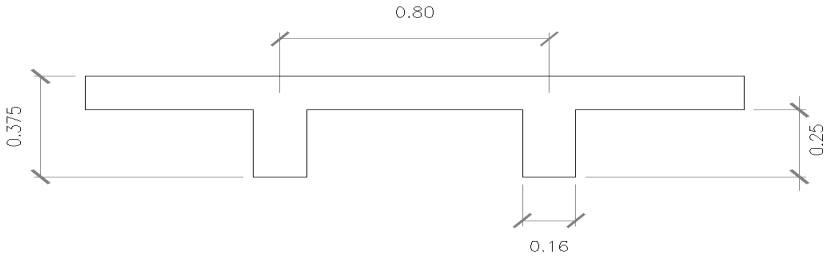

Figura 3.2. Parámetros geométricos de la tipología reticular h = 375 mm. Cotas en m

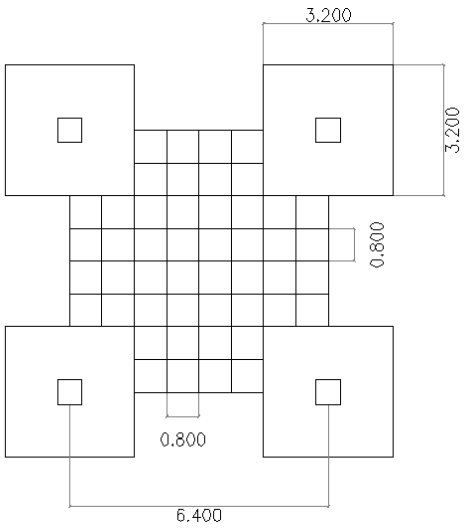

Figura 3.3. Justificación del valor de luz de 6,4 metros

Para los valores característicos de las acciones variables se tomarán las sobrecargas de uso de la estructura indicada en la tabla 3.

Sobrecargas de uso [KN/m^2]
5
10
15
20

Tabla 3.1. Valores considerados para las acciones variables

Como coeficientes parciales de seguridad de las acciones directas para las comprobaciones de los Estados Límite Últimos se adoptan los valores de la tabla 3.2 según el artículo 12 de [4], suponiendo un control intenso de ejecución.

Tipo de acción	**Valor**
Permanente	$\tilde{a}_G = 1.35$
Variable	$\tilde{a}_Q = 1.50$

Tabla 3.2. Coeficientes parciales de seguridad de las acciones directas para la comprobación a Estados Límites Últimos

Como coeficientes parciales de seguridad de las acciones directas para las comprobaciones de los Estados Límite de Servicio se adoptan los valores de la tabla 5 según el artículo 12 de [4].

Tipo de acción	**Efecto favorable**	**Efecto desfavorable**
Permanente	$\tilde{a}_G = 1.00$	$\tilde{a}_G = 1.00$
Pretensado-Postesado	$\tilde{a}_Q = 1.00$*	$\tilde{a}_Q = 1.15$*
Variable	$\tilde{a}_G = 0.00$	$\tilde{a}_G = 1.00$

* El modelo de cálculo para hormigón pretensado [9] toma los coeficientes parciales de seguridad de las acciones para las comprobaciones de los Estados Límite Últimos indicados en la tabla 3.3

Tabla 3.3. Coeficientes parciales de seguridad de las acciones directas para la comprobación a Estados Límites de Servicio

Para cada una de las acciones estudiadas se establecerán las posibles combinaciones de acciones. Para la tipología que emplea el hormigón pretensado el modelo de cálculo [9] considera cuatro estados de carga, las acciones permanentes i de pretensado uniformemente distribuidas (2 estados) y la sobrecarga de uso alternada en vanos pares e impares (2 estados). Para la tipología que emplea el hormigón armado y la reticular el modelo de cálculo [10] considera las combinaciones de acciones establecidas en al articulado de EHE-08.

Tras la definición de las acciones a considerar, se hará una combinación de los parámetros espesor, luz y cargas con las tres tipologías de estudio consideradas. El resumen de todas las soluciones alternativas y que se van a estudiar en esta tesina se muestran en las tablas 3.4 a 3.7.

Espesor [mm]	**Luz [m]**	**Cargas [KN/m^2]**
150	4.0	5
		10
		15
		20
	6.4	5
		10
		15
		20
		5
	8.0	10
		15
		20
		5
	12.0	10
		15
		20
		5

Tabla 3.4. Combinación de parámetros estructurales para h = 150 mm y las tres tipologías de forjados

Espesor [mm]	**Luz [m]**	**Cargas [KN/m^2]**
200	4.0	5
		10
		15
		20
	6.4	5
		10
		15
		20
		5
	8.0	10
		15
		20
		5
	12.0	10
		15
		20
		5

Tabla 3.5. Combinación de parámetros estructurales para h = 200 mm y las tres tipologías de forjados

Espesor [mm]	Luz [m]	Cargas [KN/m^2]
300	4.0	5
		10
		15
		20
	6.4	5
		10
		15
		20
		5
	8.0	10
		15
		20
		5
	12.0	10
		15
		20
		5

Tabla 3.6. Combinación de parámetros estructurales para h = 300 mm y las tres tipologías de forjados

Espesor [mm]	Luz [m]	Cargas [KN/m^2]
375	4.0	5
		10
		15
		20
	6.4	5
		10
		15
		20
		5
	8.0	10
		15
		20
		5
	12.0	10
		15
		20
		5

Tabla 3.7. Combinación de parámetros estructurales para h = 375 mm y las tres tipologías de forjados

El análisis estructural global de las soluciones se llevará a cabo de acuerdo con la metodología del análisis lineal. Está basado en la hipótesis de comportamiento elástico-lineal de los materiales constituyentes y una consideración del equilibrio de la estructura sin deformar. El análisis lineal elástico se considera adecuado para obtener esfuerzos tanto en Estados Límite Últimos como Estados Límite de Servicio en todo tipo de estructuras según el artículo 19 de [4].

Para el caso particular de la tipología pretensada, además, se consideran las siguientes hipótesis para su análisis estructural:

- Sistema estructural considerado: bidireccional

- Reducción de momentos a cara de soporte: los momentos característicos y de diseño se calculan a centro de soporte y esta hipótesis tiene en cuenta la reducción que se produce de los mismos a cara de soporte.

- Elección del sistema de pretensado adherente

- Área cordón de pretensado de 140 mm^2 o 15,2”

- Las tensiones en vacío se limitan a [11]:

  Compresión → $\sigma_{concrete}^{inf}$ (t = 7días) ≥ -0.60 · f_{ck},7 = 15.3 MPa

  Tracción → $\sigma_{concrete}^{sup}$ (t = 7 días) ≤ $f_{ct,k,}$7 = 1.75 MPa

- Las tensiones en servicio se limitan a [11]:

  Compresión → $\sigma_{concrete}^{sup}$ (t = ∞) ≥ -0.60 · f_{ck},∞ = 21 MPa

  Tracción → $\sigma_{concrete}^{inf}$ (t = ∞) ≤ $f_{ct,k,}\infty = f_{ct,k,}28 = 0.21 \cdot (f_{ck})^{2/3}$ = 2.25 MPa

- La precompresión o fuerza total del pretensado dividida por el área total de la sección de estudio se limita a unos valores mínimos y máximos de [9]:

  P/A mínima → 0.85 MPa
  P/A máxima → 2 MPa

- Los porcentajes mínimos y máximos de la carga muerta o peso propio de la estructura que se compensa con el pretensado [12]:

  $W_{balance\ minimum}$ = 25%
  $W_{balance\ maximum}$ = 150%

- μ = 0.06 → Coeficiente de rozamiento en curva según el artículo 20 de [4]

- k/ μ = 0.00048 → Coeficiente de rozamiento parásito según el artículo 20 de [4]

- a = 6 mm → Penetración de la cuña

3.3 COMPROBACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE SEGÚN EHE-08

Se citan a continuación los modelos de cálculo empleados, sus características fundamentales y bases de cálculo. Posteriormente se desarrollará la comprobación de los Estados Límite según el artículo 8 de [4] para cada una de las tipologías de forjado in situ estudiadas.

Para la tipología pretensada se empleará un software de cálculo de nombre comercial ADAPT-PT, de la empresa norte americana ADAPT [9]. Es útil cuando se necesita armadura activa en estructuras como edificios de viviendas, estructuras de aparcamientos o grandes superficies. Determina la cuantía de armadura necesaria y el

perfil del pretensado, así como cualquier armadura pasiva suplementaria. Basado en el método de los pórticos equivalentes y el método matricial para el cálculo de los esfuerzos, ADAPT-PT es el software estándar en la industria para los ingenieros especializados en estructuras pretensadas.

La normativa con la que trabaja es la del 'American Concrete Institute' del año 1999, llamada ACI 318-99 [12].

Para las tipologías que emplean la técnica del hormigón armado y la reticular se acude al Prontuario Informático de la EHE-08 [10]. Para la determinación de los esfuerzos usa las bases de cálculo y los modelos constitutivos de la EHE-08 [4] para la simulación a nivel seccional. Las bases de cálculo citadas se centran en la teoría de los Estados Límite, según el artículo 8 de [4].

Para ambos modelos de cálculo, el método de diseño consiste en un proceso iterativo de dos etapas. En la primera se introducen los datos de la estructura que se desea modelar y en la segunda el programa de cálculo realiza todas las comprobaciones necesarias para el correcto dimensionado de la estructura.

3.3.1 Comprobación de Estados Límite para el forjado de HP

El criterio de diseño del trazado y fuerza de pretensado se basa en el control de las tensiones del hormigón en las fibras extremas.

Primero se comprobaran las tensiones en vacío. Se consideran únicamente las acciones debidas al pretensado y peso propio de la losa. La fuerza de pretensado se toma tras las pérdidas instantáneas y las características del hormigón se toman a la edad del tesado.

A continuación se comprobaran las tensiones en servicio. Se realizará a partir de la envolvente de servicio mediante un cálculo elástico a partir de los valores de área e inercia bruta de la sección. En servicio las tensiones de cálculo se obtienen con la fuerza de pretensado final, después de pérdidas instantáneas y diferidas.

Para la comprobación de los Estados Límites Últimos frente a solicitaciones normales ADAPT-PT usa las bases de cálculo del ACI [12].

Para la comprobación del Estado Límite Último de Punzonamiento se usan las bases de la EHE-08 [4].

Para la comprobación de los Estados Límite de Servicio se verificará sólo el Estado Límite de Deformaciones. La introducción del pretensado confiere a la pieza mayor rigidez al no permitir su fisuración en servicio, por lo tanto no es necesario comprobar el Estado Límite de Fisuración. Respecto a las deformaciones, se verificará que la flecha total obtenida sea inferior al mínimo valor de entre {L/250; 2,0 cm}, según el artículo 50 de [4].

Tras la comprobación de los Estados Límites según EHE-08, se distribuye adecuadamente en toda la superficie el acero para armaduras pasivas corrugadas (ver figura 3.4), según el artículo 55 de [4] y el acero para armaduras activas uniformemente.

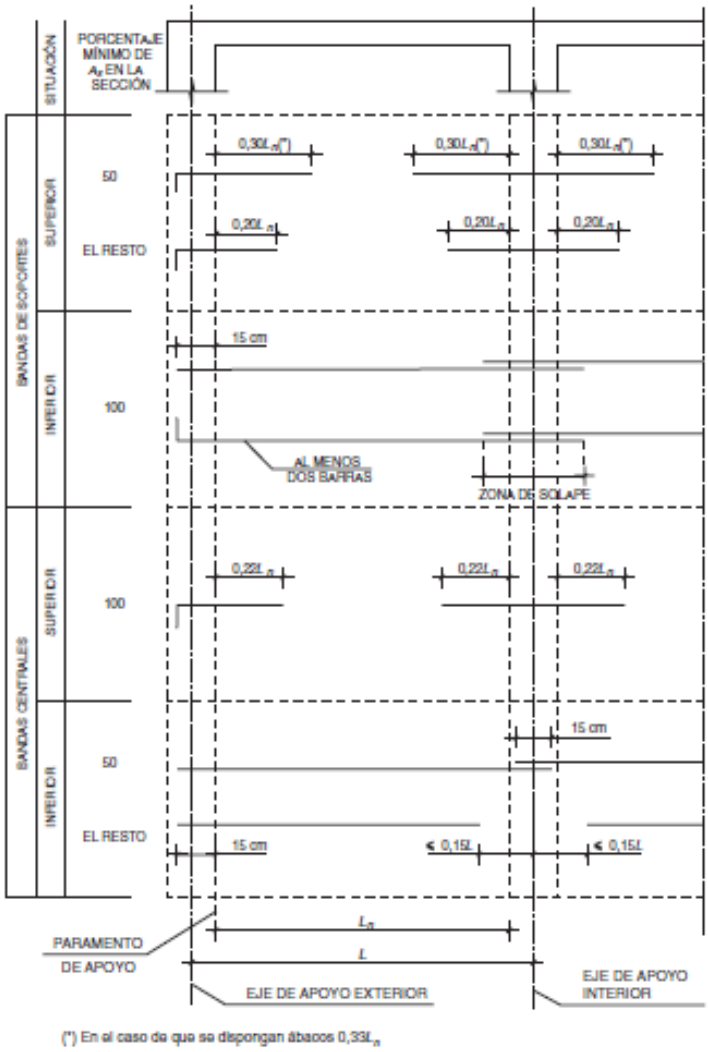

Figura 3.4. Disposición y longitudes mínimas de armaduras para placas macizas y aligeradas

Se ha considerado sólo la distribución de bandas de soportes en todos los casos estudiados, quedando así del lado de la seguridad.

Todos los cálculos y comprobaciones se reflejan en los anexos 2 y 3 de esta tesina.

3.3.2 Comprobación de los Estados Límite para los forjados HA y reticulares.

El criterio de diseño del acero para armadura pasiva corrugada es el equilibrio de tensiones entre el hormigón y el acero en las secciones más solicitadas.

Se comprobará el Estado Límite Último de Agotamiento frente a tensiones normales considerando un esfuerzo de flexión equivalente que tenga en cuenta el efecto producido por los momentos flectores existentes en las secciones más solicitadas.

Se comprobará el Estado Límite de Agotamiento frente a cortante. Cuando se estudia la tipología que emplea el acero para armaduras pasivas, sólo se comprobará el

punzonamiento. Para la tipología reticular se verificaran los nervios en su entrega al ábaco.

Para la comprobación de los Estados Límite de Servicio se verificarán los Estados Límite de Fisuración y los Estados Límite de Deformación, según los artículos 49 y 50 de [4] respectivamente.

Tras la comprobación de los Estados Límites según EHE-08, se distribuye adecuadamente en toda la superficie el acero para armaduras pasivas corrugadas según la figura 3.4.

Todos los cálculos y comprobaciones se reflejan en el anexo 4 de esta tesina.

3.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se analizaran los resultados obtenidos desde el punto de vista estructural y se discutirán los casos más relevantes. Se presentaran unos gráficos de evolución de cuantías de armado totales fijando los espesores y manteniendo variable los otros parámetros.

En la tabla 3.8 se presentan los resultados para h = 150 mm.

Cuantías de armadura total (kg/m^2)												
Cargas	L = 4.0 m			L = 6.4 m			L = 8.0 m			L = 12.0 m		
(KN/m^2)	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET
5	7.15	11.91		7.81	20.87		11.53	35.71				
10	7.34	11.84		11.30	38.99		14.74	58.98				
15	7.34	17.23		15.27	65.59							
20	8.28	24.16										

Tabla 3.8. Cuantías de armadura total para las tipologías de h = 150 mm

Las casillas sin resultado de la tabla 3.8 indican que la combinación resultante de parámetros y tipología de forjado no cumple los Estados Límite Últimos según el capítulo 10 de [4] o bien no se ha estudiado en esta tesina, como sucede para la tipología reticular de espesor de 150 mm según [7]. En la figura 3.5 se presentan los resultados analizados para espesores de 150 mm.

Se procede con el análisis estructural de los resultados de la figura 3.5 con aras de ofrecer un rango de soluciones óptimas a falta del análisis de sensibilidad.

En la figura 3.5 se ha trazado una recta divisoria para separar los resultados en dos grandes grupos, cuantías de armadura menores y mayores a 20 kg/m^2 Las soluciones por debajo de esta línea se consideraran alternativas por no presentar unos valores extremos. Las soluciones por encima, sobretodo a partir de los 10 KN/m^2, reflejan unas cuantías claramente muy superiores a la de sus alternativas, por lo que pueden descartarse desde este análisis estructural.

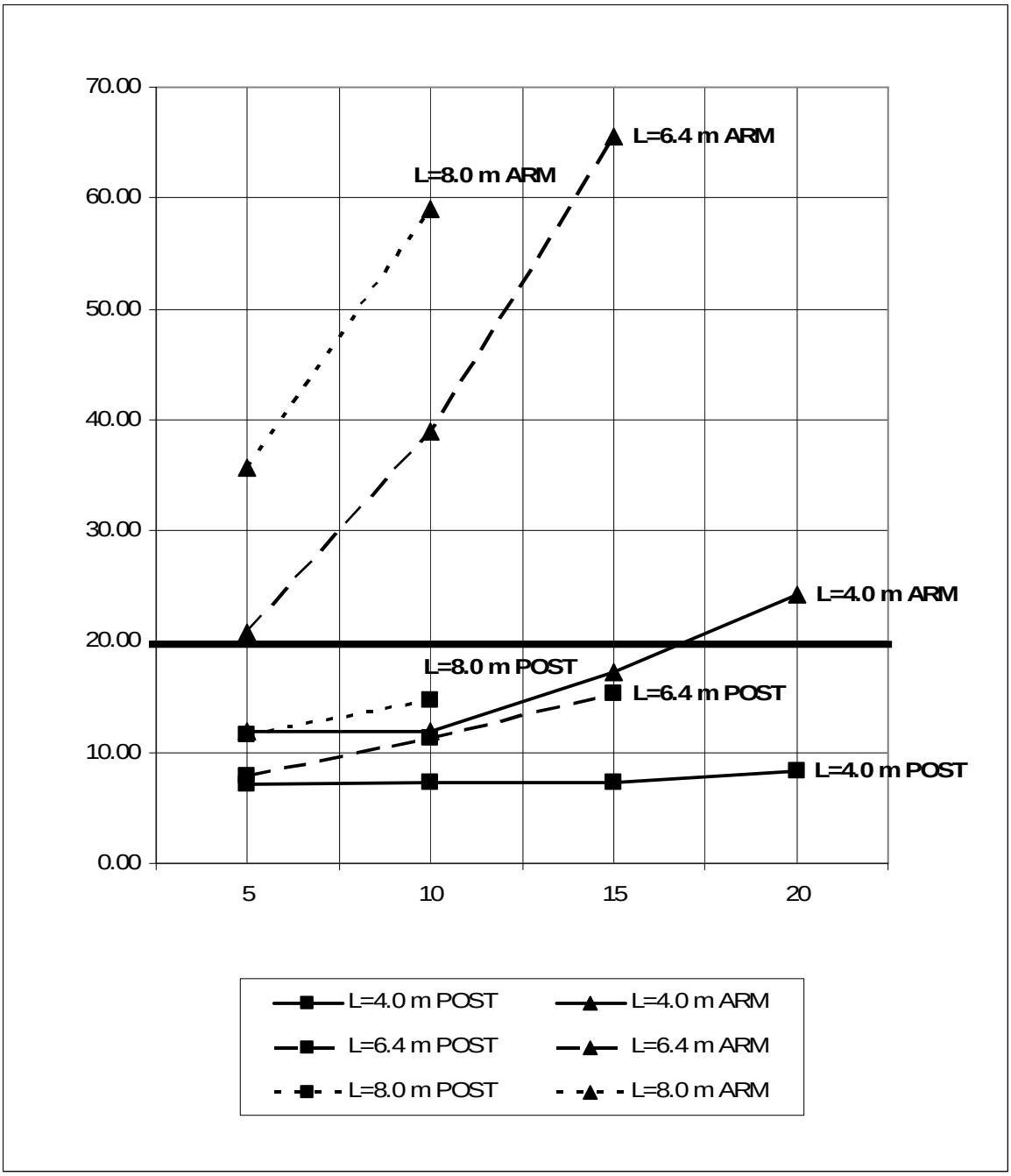

Figura 3.5. Evolución de las cuantías de armadura en función de las cargas para h = 150 mm

Para el análisis integral se descartaran las soluciones siguientes según la figura 3.5:

- Tipología de hormigón armado convencional con h = 150 mm y luz de 6,4 m
- Tipología de hormigón armado convencional con h = 150 mm y luz de 8,0 m

En la tabla 3.9 se presentan los resultados para h = 200 mm.

Cuantías de armadura total (kg/m^2)												
SC uso	L = 4.0 m			L = 6.4 m			L = 8.0 m			L = 12.0 m		
(KN/m^2)	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET
5	7.90	14.47		7.74	15.88		9.42	24.65		19.11	66.47	
10	7.90	14.47		10.19	25.76		12.99	43.38				
15	8.20	14.77		12.30	40.23		18.13	70.02				
20	8.20	16.34		14.56	45.87							

Tabla 3.9. Cuantías de armadura total para las tipologías de h=200 mm

Las casillas sin resultado de la tabla 3.9 indican que la combinación resultante de parámetros y tipología de forjado no cumple los Estados Límite Últimos o bien no se ha estudiado en esta tesina, como sucede para la tipología reticular de espesor de 200 mm según [7]. En la figura 3.6 se presentan los resultados analizados para espesores de 200 mm.

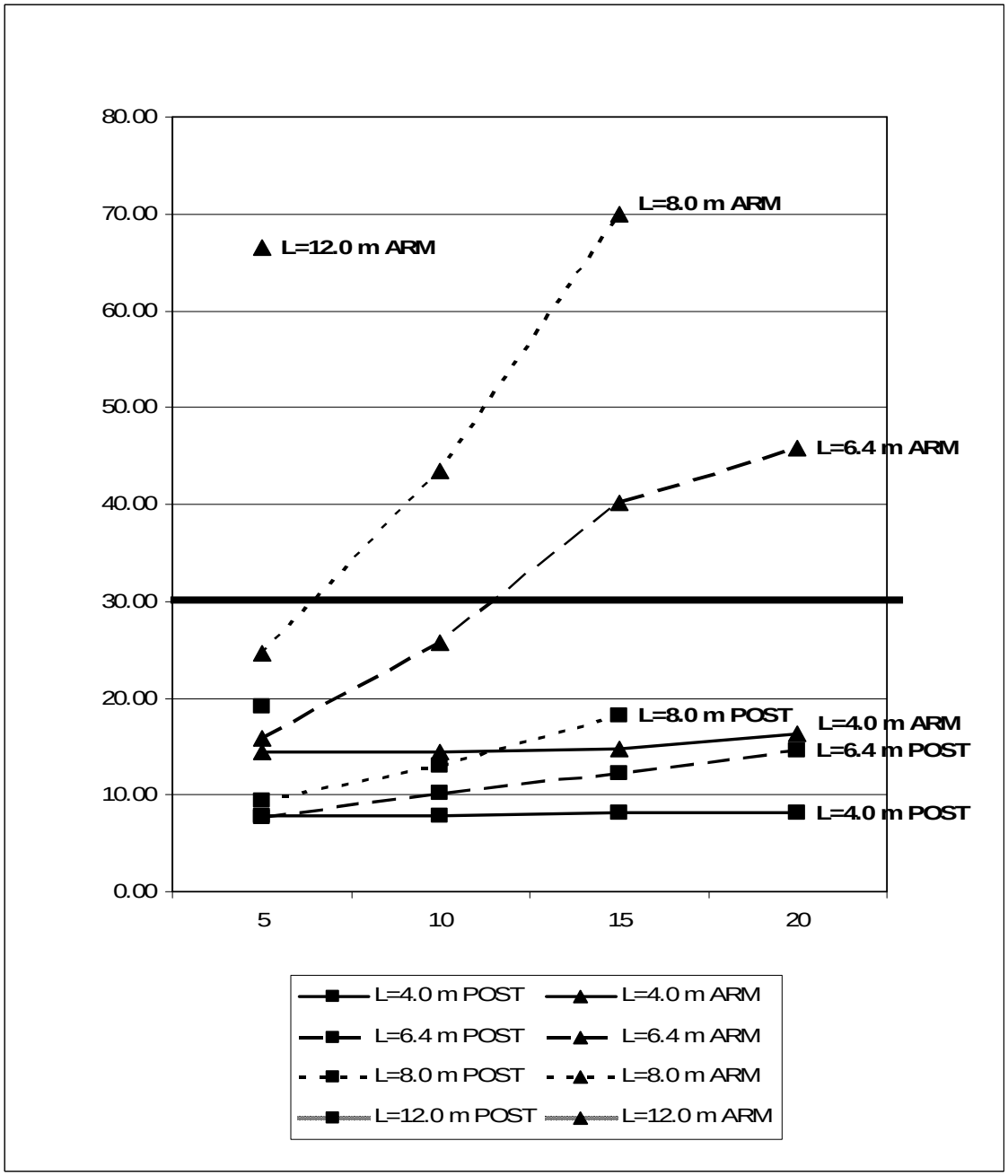

Figura 3.6. Evolución de las cuantías de armadura en función de las cargas para h = 200 mm

Se procede con el análisis estructural de los resultados de la figura 3.9 con aras de ofrecer un rango de soluciones óptimas a falta del análisis de sensibilidad.

En la figura 3.6 se ha trazado una recta divisoria para separar los resultados en dos grandes grupos, cuantías de armadura menores y mayores a 30 kg/m^2. Las soluciones por debajo de esta línea se consideraran alternativas por no presentar unos valores extremos. Las soluciones por encima reflejan unas cuantías claramente muy superiores a la de sus alternativas, por lo que pueden descartarse ya desde este análisis estructural. Para el análisis integral se descartaran las soluciones siguientes según la figura 6:

- Tipología de hormigón armado convencional con h = 200 mm, luz de 6,4 m y cargas desde los 15 KN/m^2.
- Tipología de hormigón armado convencional con h = 200 mm, luz de 8,0 m y cargas desde los 10 KN/m^2.
- Cualquier tipología estructural con h = 200 mm y luz de 12.0 m. El análisis estructural ha obtenido resultados hasta cargas de 5 KN/m^2. A partir de este valor, el Estado Límite Último no se cumple.

En la tabla 12 se presentan los resultados para h = 300 mm.

Cuantía de armadura total (kg/m^2)												
SC uso	L = 4.0 m			L = 6.4 m			L = 8.0 m			L = 12.0 m		
(KN/m^2)	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET
5	10.73	21.73	13.47	10.35	21.18	14.64	10.52	18.79	18.20	13.57	42.57	
10	10.73	21.73	13.47	10.71	21.52	21.28	12.28	27.40	25.01	19.82	70.21	
15	10.73	21.73	13.47	10.75	24.95	27.43	15.14	49.64	36.69			
20	10.73	21.73	16.97	12.41	32.65	32.14	17.66	56.82	46.52			

Tabla 3.10. Cuantías de armadura total para las tipologías de h = 300 mm

Las casillas sin resultado de la tabla 3.10 indican que la combinación resultante de parámetros y tipología de forjado no cumple los Estados Límite Últimos. En la figura 3.7 se presentan los resultados analizados para espesores de 300 mm.

Se procede con el análisis estructural de los resultados de la figura 3.7 con aras de ofrecer un rango de soluciones óptimas a falta del análisis de sensibilidad.

Se ha trazado una recta divisoria a 45º, según se aprecia en la figura 3.7, para separar los resultados. Se descartarán las tipologías de hormigón armado convencional de espesor 300 mm y luz de 12 metros por requerir a Estado Límite Último unas cuantías de armadura desorbitadas en comparación con las otras alternativas. No tan considerable pero también importante es la cuantía requerida por la misma tipología para luces de 8 metros y desde los 15 KN/m^2. Para el análisis integral se descartaran las soluciones siguientes según la figura 7:

- Tipología de hormigón armado convencional con h = 300 mm y luz de 12,0 m.
- Tipología de hormigón armado convencional con h = 300 mm, luz de 8,0 m y cargas desde los 15 KN/m^2.

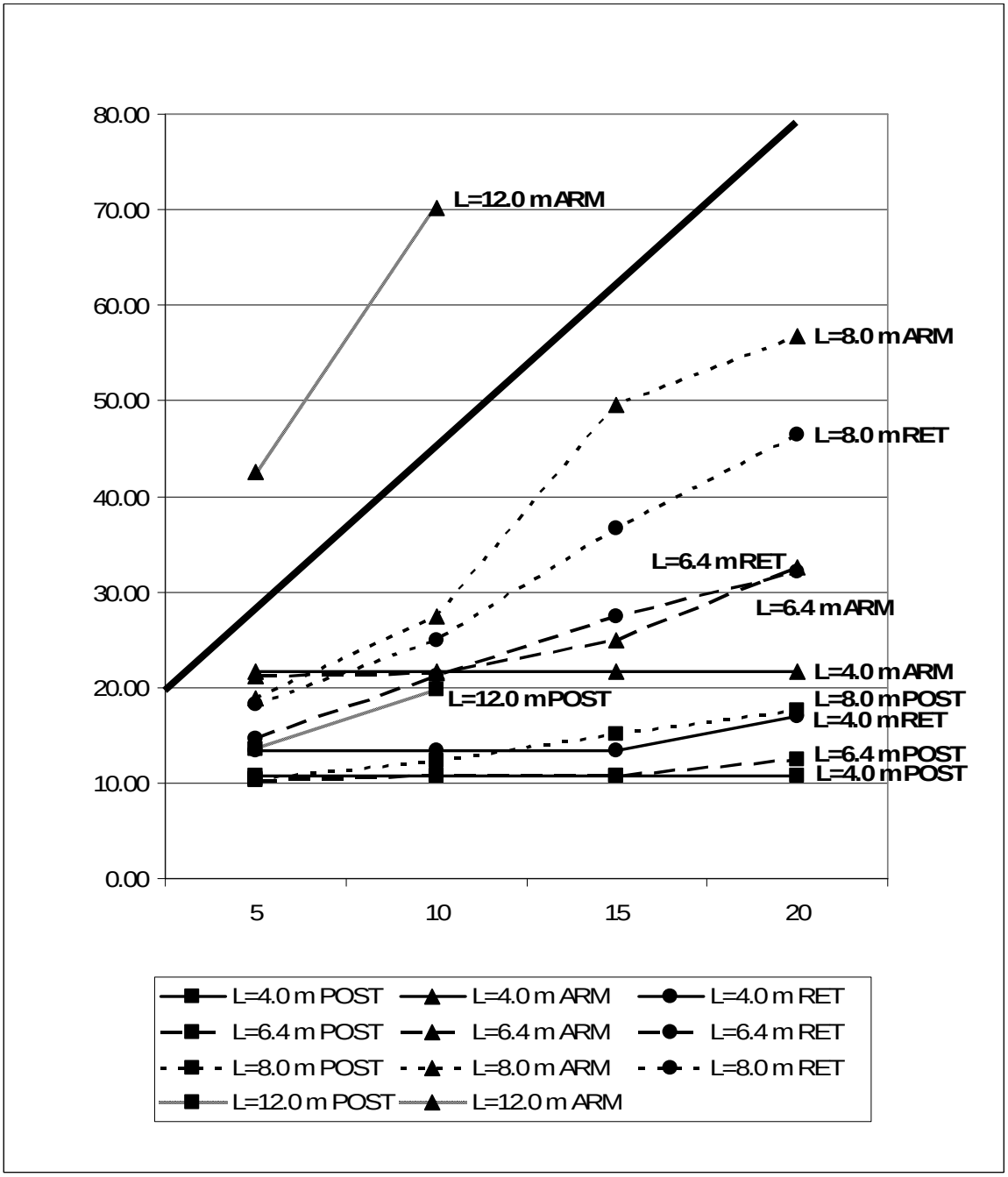

Figura 3.7. Evolución de las cuantías de armadura en función de las cargas para h = 300 mm

En la tabla 3.11 se presentan los resultados para h = 375 mm.

Cuantía de armadura total (kg/m^2)												
SC uso	L = 4.0 m			L = 6.4 m			L = 8.0 m			L = 12.0 m		
(KN/m^2)	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET	PT	ARM	RET
5	13.02	27.04	20.57	12.54	26.42	18.31	12.65	26.13	16.69	16.37	36.23	94.27
10	13.02	27.04	20.57	12.80	26.69	18.59	12.81	26.89	23.81	18.46	55.38	
15	13.02	27.04	20.57	13.01	27.56	21.67	13.92	23.59	28.05			
20	17.36	27.04	21.23	13.27	26.52	27.77	17.03	44.11	38.30			

Tabla 3.11. Cuantías de armadura total para las tipologías de h = 375 mm

Las casillas sin resultado de la tabla 3.11 indican que la combinación resultante de parámetros y tipología de forjado no cumple los Estados Límite Últimos. En la figura 3.8 se presentan los resultados analizados para espesores de 375 mm.

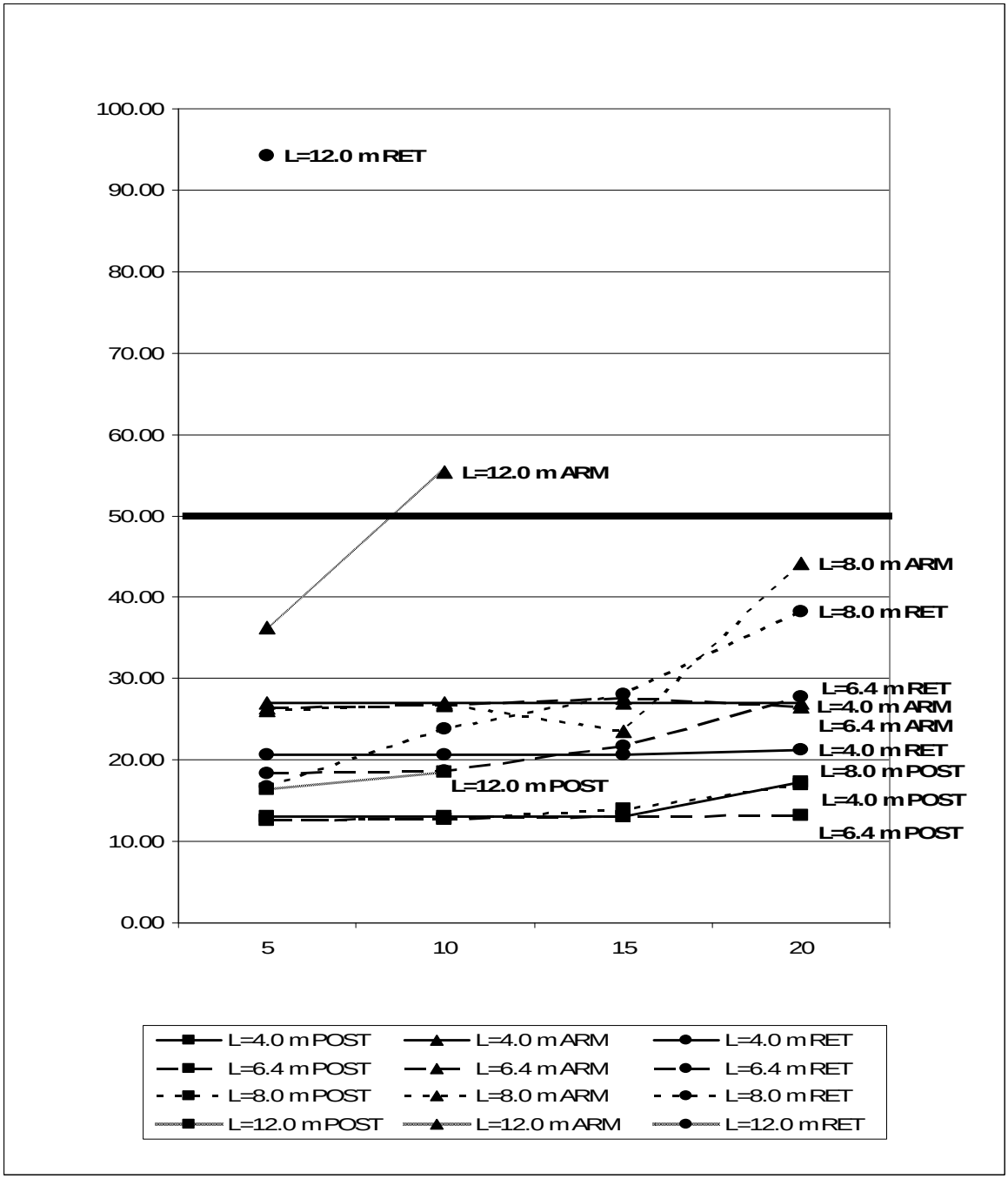

Figura 3.8. Evolución de las cuantías de armadura en función de las cargas para h = 375 mm

Se procede con el análisis estructural de los resultados de la figura 3.8 con aras de ofrecer un rango de soluciones óptimas a falta del análisis de sensibilidad.

Se ha trazado una recta divisoria para separar los resultados en dos grandes grupos, cuantías de armadura menores y mayores a 50 kg/m^2 Las soluciones por debajo de esta línea se consideraran alternativas por no presentar unos valores extremos. Las soluciones por encima reflejan unas cuantías claramente muy superiores a la de sus

alternativas, por lo que pueden descartarse ya desde este análisis estructural. La tipología reticular para luces de 12 metros, que demanda unas cuantías de más de 90 kg/m^2, obedece al cumplimiento de los Estados Límite de Servicio. Por requerimientos de Estados Límites Últimos se exigía una cuantía de armadura 42,56 kg/m^2, según el anexo 4 de esta tesina. Para el análisis integral se descartaran las soluciones siguientes según la figura 3.8:

- Tipología de hormigón armado convencional con h = 375 mm, luz de 12,0 m y cargas desde los 10 KN/m^2.
- Tipología de hormigón reticular con h = 375 mm y luz de 12,0 m

Con el fin de visualizar con más detalle la zona con cuantías inferiores a 50 kg/m^2 de la figura 3.8, se obviará la solución reticulada de 12 metros de luz en la figura 3.9.

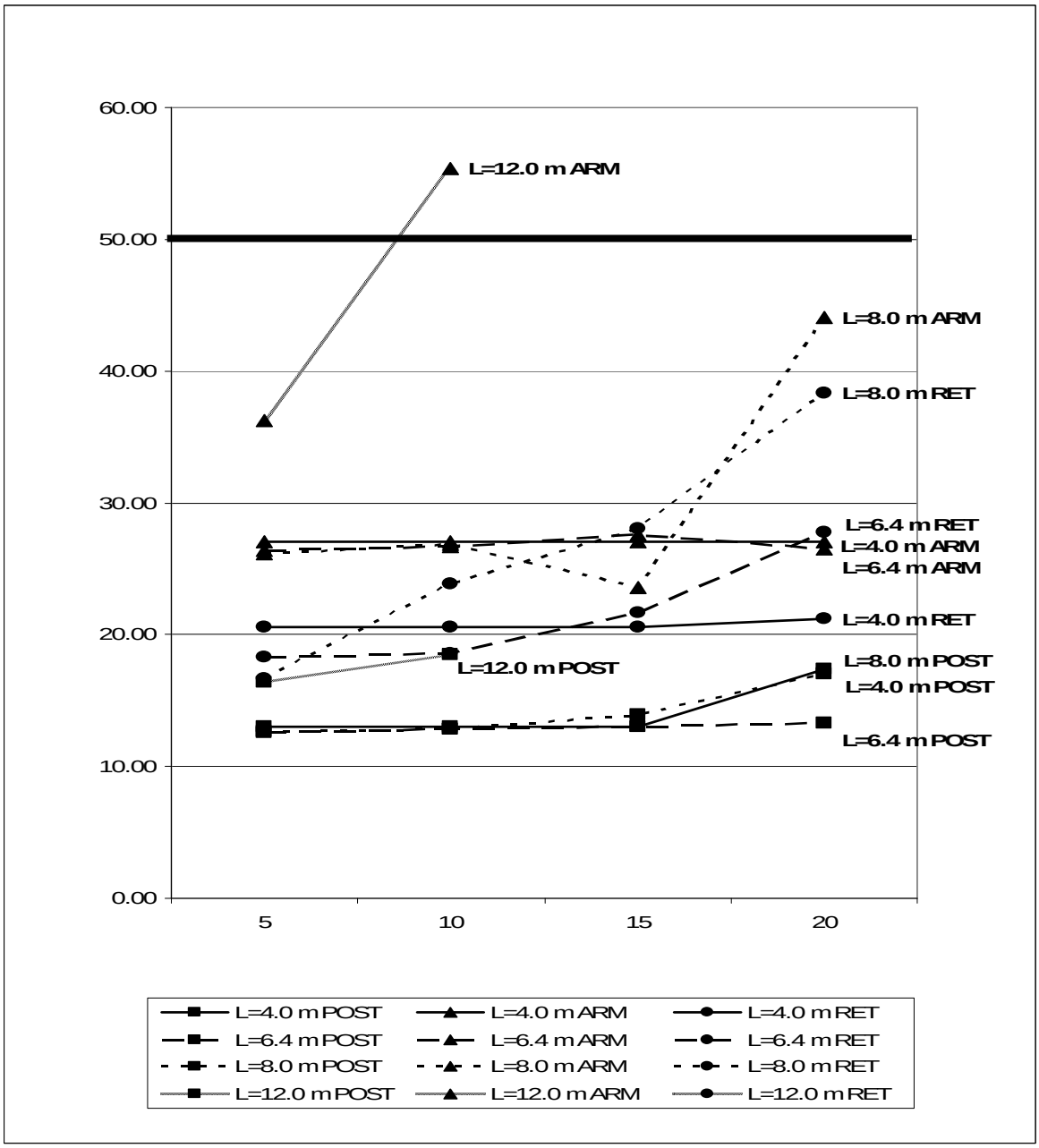

Figura 3. 9. Zoom de la evolución de cuantías de armadura en función de las cargas para h = 375 mm

3.5. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En las siguientes tablas 3.12 a 3.15 se presentan unos rangos aproximados y a falta del análisis de sostenibilidad, de las soluciones de forjados in situ más óptimas en base a sus cuantías de armadura para espesores de 150, 200, 300 y 375 mm respectivamente.

Espesor [mm]	Luz [m]	Cargas [KN/m^2]	Tipología pretensada	Tipología armada convencional	Tipología reticular
150	4.0	5	OK	OK	
		10	OK	OK	
		15	OK	OK	
		20	OK	OK	
	6.4	5	OK		
		10	OK		
		15	OK		
		20			
	8.0	5	OK		
		10	OK		
		15			
		20			
	12.0	5			
		10			
		15			
		20			

Tabla 3.12. Solución óptimas para h = 150 mm en base a cuantías de armadura

Espesor [mm]	Luz [m]	Cargas [KN/m^2]	Tipología pretensada	Tipología armada convencional	Tipología reticular
200	4.0	5	OK	OK	
		10	OK	OK	
		15	OK	OK	
		20	OK	OK	
	6.4	5	OK	OK	
		10	OK	OK	
		15	OK		
		20	OK		
	8.0	5	OK	OK	
		10	OK		
		15	OK		
		20			
	12.0	5	OK		
		10			
		15			
		20			

Tabla 3.13. Solución óptimas para h = 200 mm en base a cuantías de armadura

El rango de posibilidades aumenta a medida que se incrementa el espesor del forjado.

Espesor [mm]	**Luz [m]**	**Cargas [KN/m^2]**	**Tipología pretensada**	**Tipología armada convencional**	**Tipología reticular**
150	4.0	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK	OK	OK
		20	OK	OK	OK
	6.4	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK	OK	OK
		20	OK	OK	OK
	8.0	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK		OK
		20	OK		OK
	12.0	5	OK		
		10	OK		
		15	OK		
		20	OK		

Tabla 3.14. Solución óptimas para h = 300 mm en base a cuantías de armadura

Espesor [mm]	**Luz [m]**	**Cargas [KN/m^2]**	**Tipología pretensada**	**Tipología armada convencional**	**Tipología reticular**
200	4.0	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK	OK	OK
		20	OK	OK	OK
	6.4	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK	OK	OK
		20	OK	OK	OK
	8.0	5	OK	OK	OK
		10	OK	OK	OK
		15	OK	OK	OK
		20	OK	OK	OK
	12.0	5	OK	OK	
		10	OK		
		15	OK		
		20	OK		

Tabla 3.15. Solución óptimas para h = 375 mm en base a cuantías de armadura

CAPÍTULO 4.

EVALUACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL ANÁLISIS INTEGRAL

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán y evaluaran los requerimientos del análisis de sostenibilidad que usará el método de evaluación MIVES y se explicará cómo se aplica este método en el análisis.

El primero de los requerimientos que se va a estudiar permitirá un segundo filtrado de alternativas, con aras de acotar los rangos de soluciones óptimas que se han obtenido en el capítulo 3.

4.2 ESTABLECIMIENTO DEL ÁRBOL DE TOMA DE DECISIONES

Este apartado se destina a establecer el árbol de requerimientos (ver tabla 4.1) que servirá para evaluar cada alternativa desde el punto de vista de la sostenibilidad. Asimismo, se describirán los requerimientos e indicadores considerados.

CRITERIOS	SUBCRITERIOS	INDICADORES
Económicos	- Coste directo - Coste indirecto (tiempo)	€/m^2 €/m^2
Sociales	- Seguridad - Molestias a usuarios	Atributos Atributos
Ambientales	- Consumo materias primas - Consumo energía - Generación de residuos	T/m^2 Atributos m^3/m^2 obra

Tabla 4.1. Criterios de valoración de las alternativas

4.2.1. Criterio económico

Es uno de los requerimientos más determinantes, por esta razón se orientará hacia un segundo filtrado de alternativas.

Se ha desarrollado considerando los costes de los materiales empleados, la mano de obra requerida y la maquinaria necesaria para cada una de las soluciones alternativas.

Se obviaran aspectos como el coste y plazo del encofrado de cada una de las alternativas. Se considerará que todas las actividades que no formen parte del forjado propiamente dicho son similares y, por lo tanto, no se tendrán en cuenta para este análisis comparativo. Se podrá hacer esta exclusión por tratarse de forjados ejecutados in situ, donde el coste y plazo del encofrado no varía sustancialmente.

Los costes se extraen del banco de precios de GISA para edificación [13] y en la tabla 4.2 se presentan los asociados a los materiales empleados para las alternativas de estudio.

Materiales	**Unidades**	**Precio**
Cordón de pretensado Y1860 S7 15.2	€/kg	0.88
Acero en barras corrugadas B500S, con límite elástico ≥ 500 N/mm^2.	€/kg	0.61
Hormigón HA-35/F/20/IIb, incluido transporte a obra.	€/m^3	77.71
Hormigón HP-35/F/20/IIb, incluido transporte a obra.	€/m^3	80.36
Anclaje activo/pasivo para tendón monotorón adherente de losas postesadas, con tesado de 300 KN de fuerza máxima, con placa, cuñas y elemento de inyección, colocado.	€/ud	21.74
Vaina corrugada plástica, de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor, fijada con alambres y con soportes de acero corrugado, para losas postesadas.	€/m	2.77
Casetón recuperable 80x80 cm. con una altura de 200 mm.	€/ud	1.50
Casetón recuperable 80x80 cm. con una altura de 250 mm.	€/ud	1.80

Tabla 4.2. Costes de los materiales

Los costes pueden variar de una empresa a otra o dependiendo del periodo de tiempo que transcurra entre la elaboración y la toma de los mismos. Aún así, los incrementos se producen en todos los materiales y alternativas, con lo que no afectaría a la evaluación de la sostenibilidad.

En la tabla 4.3 se muestran los rendimientos asociados a cada actividad y los recursos necesarios para lograrla.

Actividad	**Rendimiento asociado**	**Mano de obra**
Montaje de acero para armadura pasiva corrugada	1000 kg/h	Dos oficiales 1ª + dos ayudantes
Montaje de acero para armadura activa, incluye colocación de anclajes, vaina y demás accesorios.	200 kg/h	Un oficial 1ª + un peón
Hormigonado con camión bomba	20 m^3/h	Un oficial 1ª + un peón
Tesado anclajes pretensado	20 ud/h	Un oficial 1ª + un peón
Inyección tendones pretensado	1525 m/h	Un oficial 1ª + dos peones
Replanteo de nervios y capiteles y colocación de casetones	50 m^2/h	Un oficial 1ª + un peón

Tabla 4.3. Actividades, rendimientos y recursos para cada actividad

A partir de las cuantías de material y los rendimientos se pueden evaluar y estimar los rendimientos empleados para cada actividad.

Tras desarrollar el análisis económico de todas las alternativas, se presentaran los costes para una carga de 5 KN/m^2 (ver figura 4.1). Se escoge este parámetro por ser representativo.

En las posteriores figuras 4.2 a 4.4 se mostrarán los costes para unas cargas de 10, 15 y 20 KN/m^2 respectivamente. Los espesores en ellas se incrementan de izquierda a derecha y pueden deducirse datos como:

- Evoluciones de costes según el espesor para una misma tipología y fijando la luz
- Evoluciones de costes según la luz para una misma tipología y fijando el espesor

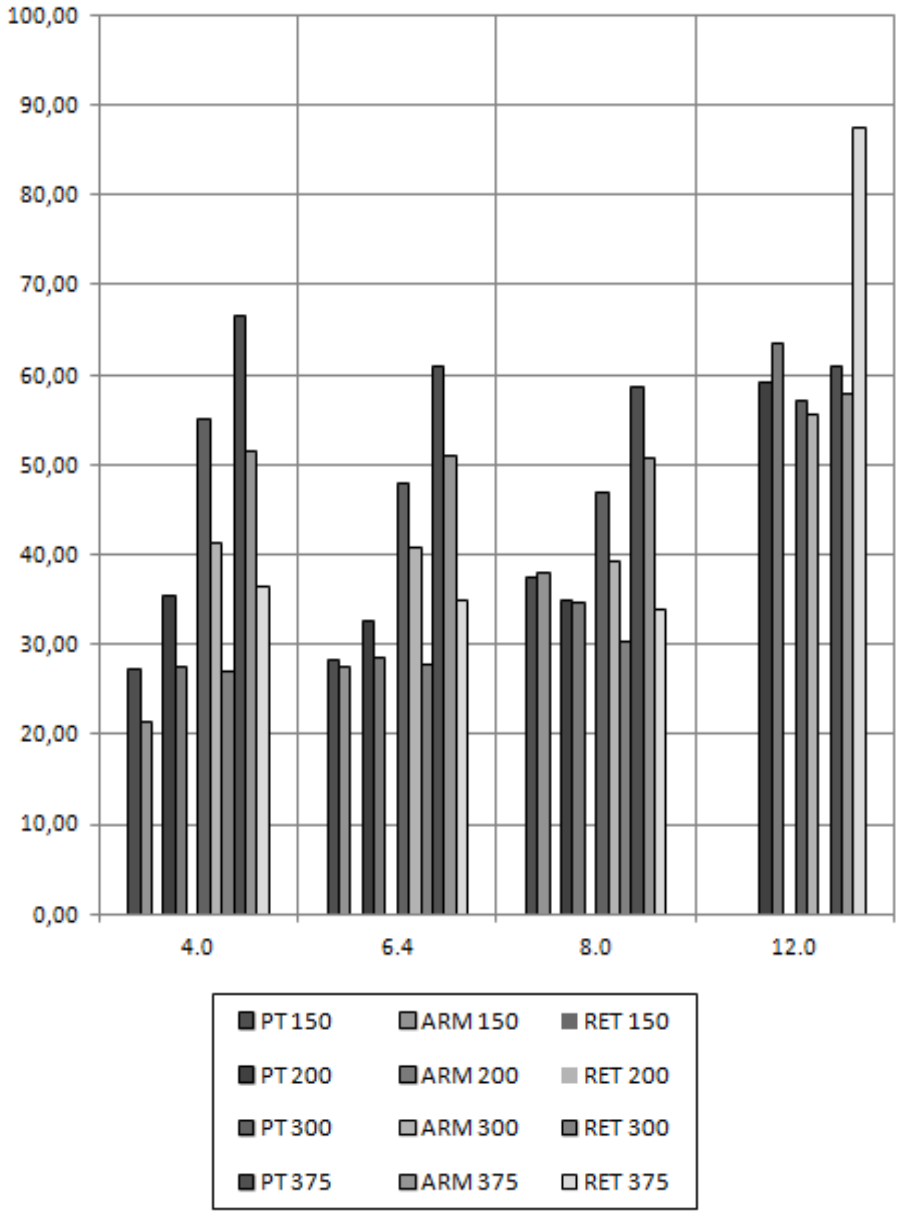

Figura 4.1. Coste por m^2 con la variación de luces para q = 5 KN/m^2

Con el fin de proporcionar un segundo filtrado de alternativas y, tras comprobar y fundamentarse en base a los resultados obtenidos en la figura 4.1, se presenta una tabla que recoge las tres soluciones óptimas desde el requerimiento económico para q = 5 KN/m^2 (ver tabla 4.4).

Coste por m^2 para una sobrecarga de uso de 5 KN/m^2					
Tipología de forjado	**Espesor [mm]**	**Luz [m]**			
		4.0	**6.4**	**8.0**	**12.0**
POSTESADA	150	**27.32**	**28.13**	37.54	
ARMADA		**21.34**	**27.55**	37.84	
RETICULAR					
POSTESADA	200	35.30	32.58	34.84	59.16
ARMADA		27.48	28.46	**34.53**	63.51
RETICULAR					
POSTESADA	300	55.13	47.99	46.89	**57.10**
ARMADA		41.24	40.86	39.21	**55.68**
RETICULAR		**26.93**	**27.74**	**30.20**	
POSTESADA	375	66.42	60.87	58.55	60.95
ARMADA		51.46	51.04	50.83	**57.83**
RETICULAR		36.44	34.88	**33.75**	87.51

Tabla 4.4. Costes por m^2 de las alternativas para q = 5 KN/m^2

Se presenta el resumen (ver tabla 4.5) de las alternativas apropiadas desde el punto de vista del requerimiento económico y para una carga de 5 KN/m^2.

Luz [m]	**q = 5 KN/m^2**		
	POSTESADA	**ARMADA**	**RETICULAR**
4.0	PT 150	ARM 150	RET 300
6.4	PT 150	ARM 150	RET 300
8.0		ARM 200	RET 300 / RET 375
12.0	PT 300	ARM 300 / ARM 375	

Tabla 4.5. Tipologías apropiadas desde el punto de vista económico para q = 5 KN/m^2 y distintas luces

Las casillas sin valor de las tablas 4.4 a 4.11 se deben al incumplimiento de los Estados Límites Últimos según el capítulo 10 de [4] por parte de las combinaciones de parámetros que se muestran.

Tras comprobar y fundamentarse en base a los resultados obtenidos en la figura 4.2, se presenta una tabla que recoge las tres soluciones óptimas desde el requerimiento económico para q = 10 KN/m^2 (ver tabla 4.6).

Se presenta el resumen (ver tabla 4.7) de las alternativas apropiadas desde el punto de vista del requerimiento económico y para una carga de 10 KN/m^2.

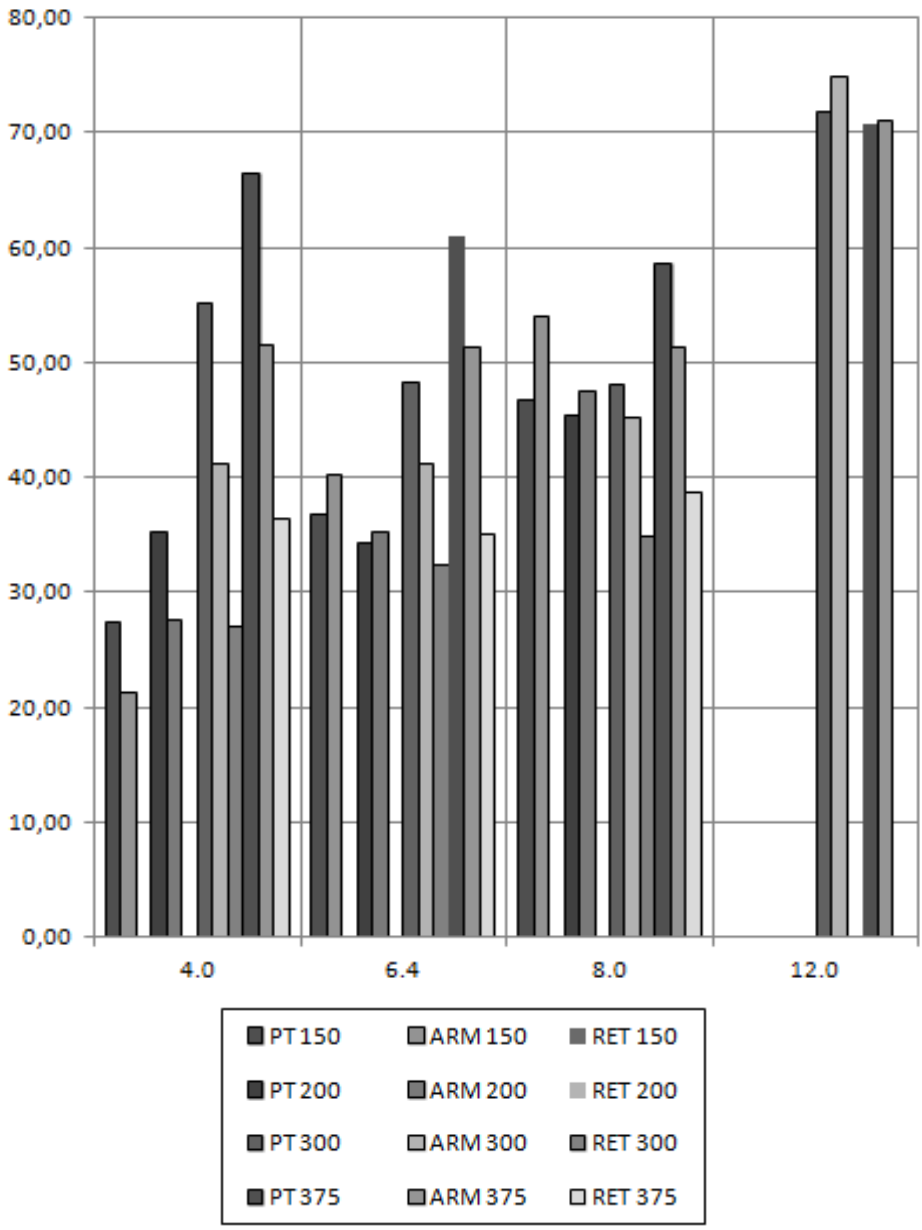

Figura 4.2. Coste por m² con la variación de luces para q = 10 KN/m²

Coste por m² para una sobrecarga de uso de 10 KN/m²					
Tipología de forjado	**Espesor [mm]**	**Luz [m]**			
		4.0	**6.4**	**8.0**	**12.0**
POSTESADA	150	**27.45**	36.69	46.64	
ARMADA		**21.30**	40.11	53.96	
RETICULAR					
POSTESADA	200	35.30	**34.28**	45.34	
ARMADA		27.48	35.30	47.51	
RETICULAR					
POSTESADA	300	55.13	48.24	48.10	**71.79**
ARMADA		41.24	41.09	**45.17**	74.83
RETICULAR		**26.93**	**32.34**	**34.92**	
POSTESADA	375	66.42	61.05	58.66	**70.69**
ARMADA		51.46	51.22	51.36	**71.10**
RETICULAR		36.44	**35.07**	**38.69**	

Tabla 4.6. Costes por m² de las alternativas para q = 10 KN/m²

Luz [m]	q = 10 KN/m^2		
	POSTESADA	**ARMADA**	**RETICULAR**
4.0	PT 150	ARM 150	RET 300
6.4	PT 200		RET 300 / RET 375
8.0		ARM 300	RET 300 / RET 375
12.0	PT 300 / PT 375	ARM 375	

Tabla 4.7. Tipologías apropiadas desde el punto de vista económico para q = 10 KN/m^2 y distintas luces

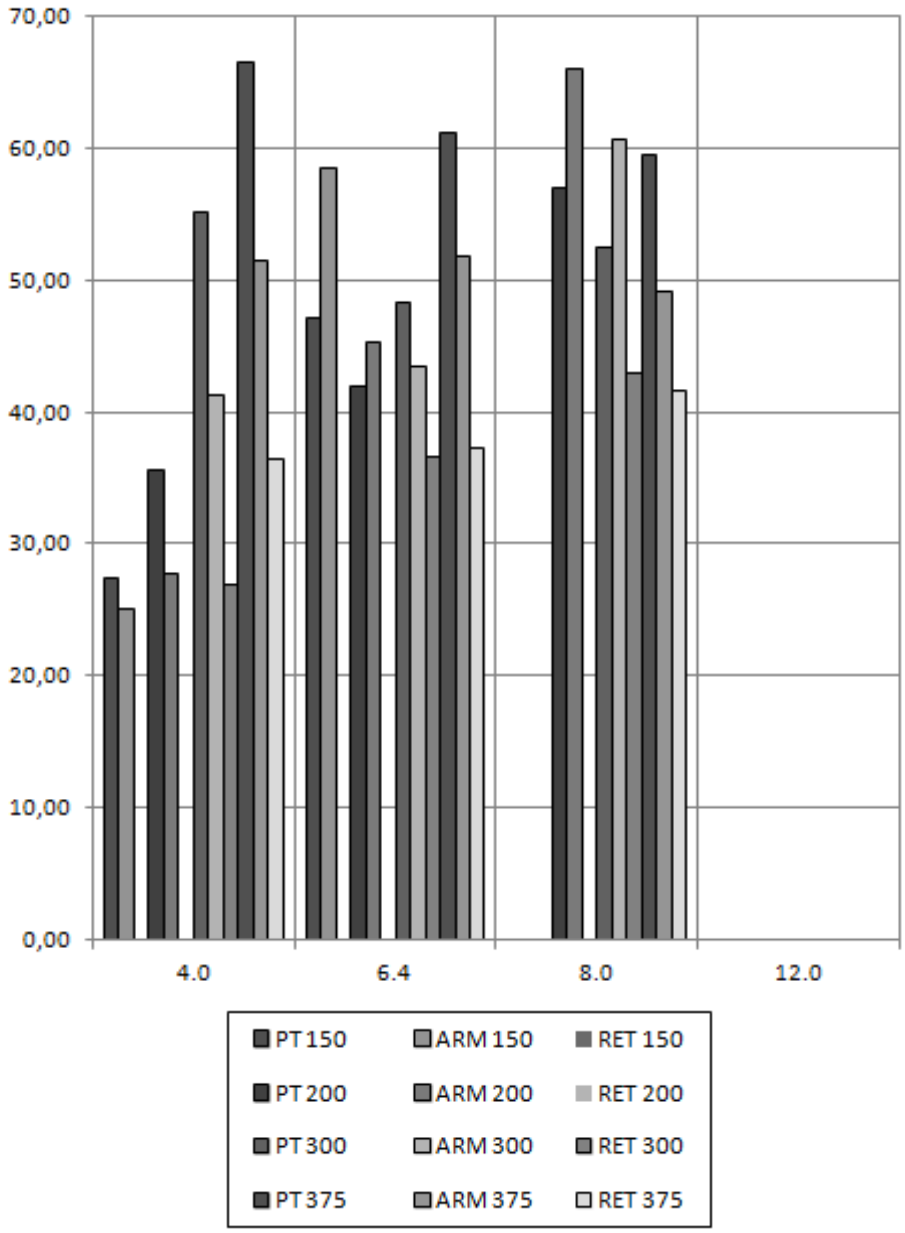

Figura 4.3. Coste por m^2 con la variación de luces para q = 15 KN/m^2

Tras comprobar y fundamentarse en base a los resultados obtenidos en la figura 4.3, se presenta una tabla que recoge las tres soluciones óptimas desde el requerimiento económico para q = 15 KN/m^2 (ver tabla 4.8).

Coste por m^2 para una sobrecarga de uso de 15 KN/m^2					
Tipología de forjado	**Espesor [mm]**	**Luz [m]**			
		4.0	**6.4**	**8.0**	**12.0**
POSTESADA	150	**27.45**	47.13		
ARMADA		**25.03**	58.54		
RETICULAR					
POSTESADA	200	35.50	**41.88**	56.92	
ARMADA		27.69	45.33	65.97	
RETICULAR					
POSTESADA	300	55.13	48.27	52.38	
ARMADA		41.24	43.47	60.58	
RETICULAR		**26.93**	**36.60**	**43.02**	
POSTESADA	375	66.42	61.19	59.43	
ARMADA		51.46	51.83	**49.08**	
RETICULAR		36.44	**37.21**	**41.63**	

Tabla 4.8. Costes por m^2 de las alternativas para q = 15 KN/m^2

Se presenta el resumen (ver tabla 4.9) de las alternativas apropiadas desde el punto de vista del requerimiento económico y para una carga de 15 KN/m^2.

Luz [m]	**q = 15 KN/m^2**		
	POSTESADA	**ARMADA**	**RETICULAR**
4.0	PT 150	ARM 150	RET 300
6.4	PT 200		RET 300 / RET 375
8.0		ARM 375	RET 300 / RET 375
12.0			

Tabla 4.9. Tipologías apropiadas desde el punto de vista económico para q = 15 KN/m^2 y distintas luces

Tras comprobar y fundamentarse en base a los resultados obtenidos en la figura 4.4, se presenta una tabla que recoge las tres soluciones óptimas desde el requerimiento económico para q = 20 KN/m^2 (ver tabla 4.10)

Coste por m^2 para una sobrecarga de uso de 20 KN/m^2					
Tipología de forjado	**Espesor [mm]**	**Luz [m]**			
		4.0	**6.4**	**8.0**	**12.0**
POSTESADA	150	**28.10**			
ARMADA		29.83			
RETICULAR					
POSTESADA	200	35.50	**48.06**		
ARMADA		**28.78**	49.24		
RETICULAR					
POSTESADA	300	55.13	49.42	**57.30**	
ARMADA		41.24	48.81	65.55	
RETICULAR		**29.35**	**39.86**	**49.83**	
POSTESADA	375	69.42	61.37	61.58	
ARMADA		51.46	51.11	63.29	
RETICULAR		36.90	**41.43**	**48.73**	

Tabla 4.10. Costes por m^2 de las alternativas para q = 20 KN/m^2

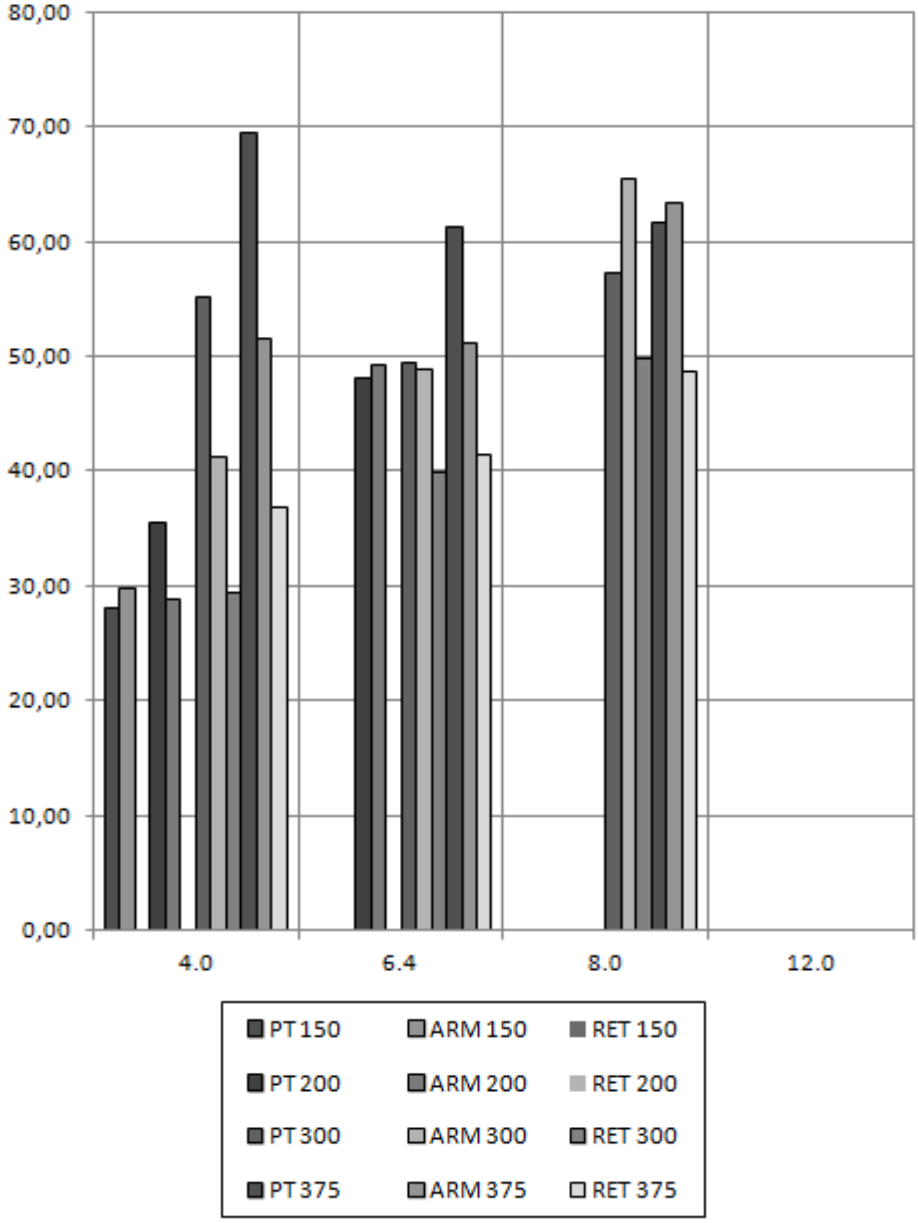

Figura 4.4. Coste por m² con la variación de luces para q = 20 KN/m²

Se presenta el resumen (ver tabla 4.11) de las alternativas apropiadas desde el punto de vista del requerimiento económico y para una carga de 20 KN/m².

Luz [m]	**q = 20 KN/m²**		
	POSTESADA	**ARMADA**	**RETICULAR**
4.0	PT 150	ARM 200	RET 300
6.4	PT 200		RET 300 / RET 375
8.0	PT 300		RET 300 / RET 375
12.0			

Tabla 4.11. Tipologías apropiadas desde el punto de vista económico para q = 20 KN/m² y distintas luces

Tras el análisis económico de todas las alternativas de estudio y, con el fin del cumplir el objetivo propuesto para este apartado, se han seleccionado las tres opciones óptimas desde este punto de vista para cada pareja de parámetros (luz, espesor).

4.2.2. Criterio social

Se citaran y evaluaran parámetros de análisis desde los puntos de vista de la seguridad y las molestias a los usuarios. Para la seguridad, se evaluarán los niveles de riesgo y se citaran los riesgos más frecuentes asociados a la ejecución de las tipologías de estudio.

4.2.2.1. Seguridad

Últimamente se ha tomado mucha conciencia en obra acerca de las medidas de seguridad. De hecho, hoy en día existe en casi todas las obras la figura de responsable de seguridad, quien supervisa todas las labores a pie de obra y penaliza a quien no las cumpla. De todos modos, la mejora de los medios de seguridad y la toma de conciencia de los trabajadores ha reducido drásticamente la accidentalidad en obra en la actualidad [14].

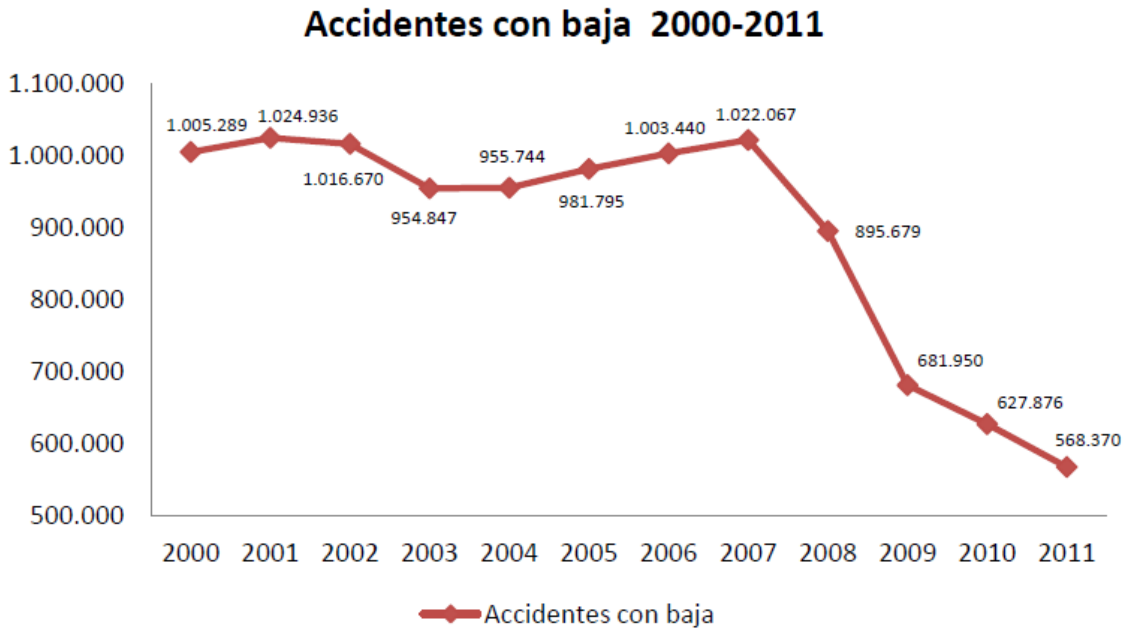

Figura 4.5. Evolución de la accidentalidad laboral con baja desde el año 2000 a 2011

En general, siempre será más segura la alternativa que conlleve una menor manipulación en obra y una menor necesidad de operarios

Como no disponemos de las herramientas suficientes para establecer claramente una determinación sobre qué forjados son los que presentan mayores riesgos, usaremos un método de análisis y evaluación inicial de riesgos. [15].

Para la evaluación, se ha seguido el sistema de evaluación Probabilidad/Gravedad aconsejado en las evaluaciones de riesgo del INSHT.

Así se recogen:

1. En un primer apartado está la Probabilidad que ocurra el daño.
2. En un segundo apartado, las Consecuencias de que el riesgo se materialice.
3. En un tercer apartado, la estimación de la Exposición al riesgo durante la jornada de trabajo.

La asignación de siglas (ver tabla 4.12) se detalla a continuación:

PROBABILIDAD	
BAJA	B
MEDIA	M
ALTA	A
CONSECUENCIA	
LEVE	L
GRAVE	G
MUY GRAVE	MG
VALORACIÓN DEL RIESGO	
MUY LEVE	ML
LEVE	L
MODERADO	M
GRAVE	G
MUY GRAVE	MG

Tabla 4.12. Asignación de siglas para los parámetros a analizar del criterio social

Una vez estimada la probabilidad y la severidad del daño para cada uno de los riesgos, se determina el nivel de riesgo según la tabla 4.13.

		PROBABILIDAD		
		BAJA	**MEDIA**	**ALTA**
CONSECUENCIAS	**LEVE**	MUY LEVE	LEVE	MODERADA
	GRAVE	LEVE	MODERADA	GRAVE
	MUY GRAVE	MODERADA	GRAVE	MUY GRAVE

Tabla 4.13. Valoraciones para cada tipo de probabilidad y consecuencias

Los niveles de riesgos indicados en la tabla 4.13 forman la base para decidir si se requiere establecer medidas para controlar el riesgo, así como la temporización de las acciones. En la tabla 4.14 se muestra un criterio sugerido como punto de partida para la toma de decisión. La tabla también indica que los esfuerzos precisos para el control de los riesgos y la urgencia con la que deben adoptarse las medidas de control, deben ser proporcionales al riesgo.

RIESGO	ACCIÓN Y TEMPORIZACIÓN
Muy leve (ML)	No requiere la adopción de medidas de control.
Leve (L)	No es necesario adoptar medidas de control. Sin embargo, es conveniente adoptar medidas que sean más rentables o que no supongan recursos importantes.
Moderado (M)	Se deben adoptar medidas específicas para controlar y reducir el riesgo, con los recursos adecuados. Las medidas para reducir el riesgo deben implantarse lo antes posible, preferiblemente antes de iniciar la actividad. Cuando el riesgo moderado está asociado a consecuencias extremadamente dañinas, se precisará una acción posterior para establecer, con más precisión, la probabilidad de daño como base para determinar las medidas de control.
Grave (G)	Se deben adoptar medidas específicas para controlar y reducir el riesgo, aunque supongan recursos considerables. No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Cuando el riesgo corresponda a un trabajo que se está realizando, debe remediarse el problema de manera urgente, paralizándose el trabajo si la medida tarda en implantarse.
Muy grave (MG)	Se deben adoptar medidas específicas para controlar y reducir el riesgo, aunque supongan recursos considerables. No debe comenzarse el trabajo hasta que se haya reducido el riesgo. Cuando el riesgo corresponda a un trabajo que se está realizando debe paralizarse inmediatamente el trabajo.

Tabla 4.14. Explicación del significado de cada valoración

A continuación se hará una la valoración de riesgos para las tipologías estudiadas (ver tablas 4.15 a 4.17) [16].

LOSA MACIZA DE HORMIGÓN PRETENSADO BIDIRECCIONAL											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración del riesgo				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Caídas a distinto nivel		X				X				X	
Caídas a mismo nivel		X		X					X		
Caída de objetos en manipulación			X			X				X	
Golpes por objetos o herramientas			X		X					X	
Proyección de fragmentos o partículas			X			X					X
Atrapamiento por o entre objetos			X			X					X
Posturas forzadas y sobreesfuerzos			X	X					X		
Contactos eléctricos indirectos			X		X				X		
Contacto con sustancias nocivas	X			X			X				
Incendios	X					X					X
Exposición al ruido			X	X				X			
Exposición a contaminantes químicos			X		X			X			
Manipulación manual de cargas			X		X				X		
Atropellos o golpes con vehículos	X					X			X		
Superposición de trabajos			X			X					X
Quemaduras	X				X			X			

Tabla 4.15. Riesgos más frecuentes para una losa maciza de hormigón pretensado bidireccional

Los riesgos con una probabilidad de ocurrencia más elevada que puede acarrear este tipo de solución constructiva son, mayoritariamente [16]:

- Caída de objetos en manipulación: El forjado postesado implica la colocación de anclajes de acero fundido, vainas, toberas de inyección, etc. Además, el proceso de tesado e inyección de los tendones de postesado conlleva tener que manipular constantemente equipos de tesado e inyección.
- Golpes por objetos o herramientas: Se trabaja con una gran cantidad de objetos en estos tipos de forjados, si lo comparamos con los forjados sin postesado.
- Proyección de fragmentos o partículas: Durante la operación de tesado, principalmente. Si han quedado coqueras tras los anclajes o no se ha dispuesto el armado de confinamiento del hormigón adecuado tras el anclaje, pueden producirse proyección de fragmentos o partículas de hormigón durante el tesado. Lo mismo sucede durante la inyección de lechada. Es un fluido formado por agua y cemento que se inyecta a presión en el interior de las vainas.
- Atrapamiento por o entre objetos: Durante el proceso de tesado debe procurarse no colocar nunca las manos entre el gato hidráulico y el anclaje. Podría producirse un aplastamiento de las extremidades.
- Posturas forzadas y sobreesfuerzos: El proceso de tesado de los tendones conlleva la constante manipulación del gato de tesado. Lo mismo sucede con el proceso de inyección; para preparar la mezcla de lechada de inyección deben vaciarse sacos de cemento de 25-35 Kg. dentro la máquina inyectadota.
- Contactos eléctricos indirectos: Se trabaja con equipos eléctricos constantemente en este tipo de solución constructiva, como el gato hidráulico y la bomba de lechada. También pueden producirse contactos eléctricos al manipular la bomba de hormigonado.
- Exposición al ruido: Lo producen los equipos de tesado e inyección.
- Exposición a contaminantes químicos: El hormigón y la lechada de inyección en contacto con la piel pueden producir quemaduras.
- Manipulación manual de cargas: El proceso de tesado de los tendones conlleva la constante manipulación del gato de tesado. Lo mismo sucede con el proceso de inyección; para preparar la mezcla de lechada de inyección deben vaciarse sacos de cemento de 25-35 Kg. dentro la máquina inyectadota.
- Superposición de trabajos: Lo normal es superponer los trabajos de tesado de tendones con otras actividades de la obra, como impermeabilizaciones u otros acabados. En el supuesto de soltarse un cordón de su anclaje durante el proceso de tesado, éste podría ir a parar a la zona donde está realizando esta otra actividad.

Las medidas preventivas asociadas a estos riesgos son la colocación de redes horizontales y verticales así como barandillas de seguridad, la colocación del rodapié en la parte inferior de las barandillas de seguridad, la red perimetral cogida con pescantes alrededor del forjado, líneas de vida si se precisa salir del perímetro seguro para realizar el tesado de los tendones [16].

LOSA MACIZA DE HORMIGÓN ARMADO BIDIRECCIONAL											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración del riesgo				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Caídas a distinto nivel		X				X				X	
Caídas a mismo nivel		X		X					X		
Caída de objetos en manipulación		X			X				X		
Golpes por objetos o herramientas		X		X				X			
Proyección de fragmentos o partículas	X				X				X		
Atrapamiento por o entre objetos		X			X				X		
Posturas forzadas y sobreesfuerzos			X	X					X		
Contactos eléctricos indirectos		X			X				X		
Contacto con sustancias nocivas	X			X			X				
Incendios	X					X					X
Exposición al ruido	X			X				X			
Exposición a contaminantes químicos		X			X			X			
Manipulación manual de cargas			X		X				X		
Atropellos o golpes con vehículos	X					X			X		
Superposición de trabajos	X			X			X				
Quemaduras	X				X			X			

Tabla 4.16. Riesgos más frecuentes para la losa maciza de hormigón armado bidireccional

Los riesgos con una probabilidad de ocurrencia más elevada que puede acarrear este tipo de solución constructiva son, mayoritariamente [16].

- Posturas forzadas y sobreesfuerzos: Los forjados que se montan únicamente con armadura pasiva suelen llevar grandes cantidades de acero. Ello conlleva la manipulación y colocación de grandes pesos de armadura en su posición definitiva.
- Manipulación manual de cargas: Se puede decir lo mismo que en el caso anterior.

Las medidas preventivas asociadas a estos riesgos son las mismas que en el caso de la losa maciza de hormigón pretensado exceptuando la línea de vida, por entenderse que todas las operaciones de montaje de armadura se llevaran a cabo dentro del perímetro de seguridad.

Los riesgos con una probabilidad de ocurrencia más elevada que puede acarrear este tipo de solución constructiva son, mayoritariamente [16].

- Caída de objetos en manipulación: El forjado reticular implica la colocación de múltiples casetones de PVC, por lo que se corre mayor riesgo de caída de objetos que en otras soluciones.
- Golpes por objetos o herramientas: De la misma forma que para las losas macizas de hormigón pretensado, se trabaja con una gran cantidad de objetos en estos tipos de soluciones; por lo tanto hay mayor probabilidad de golpes.

LOSA BIDIRECCIONAL RETICULAR O BIDIRECCIONAL ALIGERADA CON CASETONES											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración del riesgo				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Caídas a distinto nivel		X				X				X	
Caídas a mismo nivel		X		X					X		
Caída de objetos en manipulación			X		X				X		
Golpes por objetos o herramientas			X	X				X			
Proyección de fragmentos o partículas	X				X				X		
Atrapamiento por o entre objetos		X			X				X		
Posturas forzadas y sobreesfuerzos		X		X					X		
Contactos eléctricos indirectos		X			X				X		
Contacto con sustancias nocivas	X			X			X				
Incendios	X					X					X
Exposición al ruido	X			X				X			
Exposición a contaminantes químicos		X			X			X			
Manipulación manual de cargas		X			X				X		
Atropellos o golpes con vehículos	X					X			X		
Superposición de trabajos	X			X			X				
Quemaduras	X				X			X			

Tabla 4.17. Riesgos más frecuentes para la losa reticular bidireccional

Las medidas preventivas asociadas a estos riesgos son las mismas que en el caso de las losas macizas de hormigón pretensado.

Tras la obtención de estos resultados se recopilan en una tabla (ver tabla 4.18), estableciendo una puntuación para cada uno de los atributos (ML, L, M, G, MG) [16], la cual se atribuye en función de la importancia que tienen entre ellos y respetando y teniendo en cuenta que, cuanto menos riesgo tengamos, mayor puntuación se le otorgará.

	ML(8)	L(6)	M(4)	G(2)	MG(0)	TOTAL
Losa maciza de hormigón pretensado bidireccional	1	3	5	3	4	52
Losa maciza de hormigón armado bidireccional	2	4	8	1	1	74
Losa reticular bidireccional	2	4	8	1	1	74

Tabla 4.18. Evaluaciones finales de los riesgos más frecuentes

Las tipologías de hormigón armado y reticular obtienen la misma puntuación respecto a la seguridad (74). Las tipologías de hormigón pretensado acarrean mayores factores de riesgo que las otras dos, por este motivo tienen menor puntuación (52).

4.2.2.2. Molestias al entorno

Se empezaba el apartado de criterio social con el aspecto de la seguridad. También es un factor a considerar, sobretodo en entornos urbanos y cada vez más, la molestia al entorno. Este hecho está directamente relacionado con el plazo de la obra, porque cuanto más tiempo dure ésta, mayor grado de molestias causará a los vecinos. La maquinaria que debe acceder a la obra, sobretodo la pesada, es también causa de molestia. Como sólo se están evaluando forjados, sin tener en cuenta el procedimiento constructivo de la obra al completo, este último factor es más difícil de determinar a priori. Para evaluar las molestias se usará el mismo procedimiento empleado para la seguridad (ver tablas 4.19 a 4.21) [16].

LOSA MACIZA DE HORMIGÓN PRETENSADO BIDIRECCIONAL											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración de la molestia				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Tiempo de invasión de la vía pública		X		X					X		
Tráfico de maquinaria			X		X			X			
Emisión de polvo			X		X					X	
Ruido			X		X					X	

Tabla 4.19. Molestias más frecuentes de la losa maciza de hormigón pretensado bidireccional

LOSA MACIZA DE HORMIGÓN ARMADO BIDIRECCIONAL											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración de la molestia				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Tiempo de invasión de la vía pública			X	X						X	
Tráfico de maquinaria		X			X				X		
Emisión de polvo			X		X					X	
Ruido		X			X				X		

Tabla 4.20. Molestias más frecuentes de la losa maciza de hormigón armado bidireccional

LOSA RETICULAR BIDIRECCIONAL											
Riesgos identificados	Probabilidad			Consecuencias			Valoración de la molestia				
	B	M	A	L	G	MG	ML	L	M	G	MG
Tiempo de invasión de la vía pública			X	X						X	
Tráfico de maquinaria		X			X				X		
Emisión de polvo			X		X					X	
Ruido			X		X				X		

Tabla 4.21. Molestias más frecuentes de la losa reticular bidireccional

De la misma forma que para el criterio de seguridad, se recopilan los resultados obtenidos en la siguiente tabla (ver tabla 4.22) estableciendo el mismo método de valoración.

	ML(8)	L(6)	M(4)	G(2)	MG(0)	TOTAL
Losa maciza de hormigón pretensado bidireccional	0	1	1	2	0	14
Losa maciza de hormigón armado bidireccional	0	0	2	2	0	12
Losa reticular bidireccional	0	0	2	2	0	12

Tabla 4.22. Evaluaciones finales de las molestias más frecuentes

Las tipologías de hormigón armado y reticular obtienen de nuevo la misma puntuación (12) respecto a las molestias. No obstante, en este caso es la tipología de hormigón pretensado la que acarrea menores molestias al entorno por ser la que tiene mayor puntuación (14).

4.2.3. Criterio ambiental

Se analizaran aspectos relacionados con:

- Consumo de materias primas
- Consumo de energía (agua y electricidad)
- Generación de residuos en obra

4.2.3.1. Consumo de materias primas

El objetivo global de la tesina es buscar un rango de soluciones óptimas desde los puntos de vista de la sostenibilidad. Con esta premisa, uno de los aspectos siguientes a valorar será el consumo de materias primas. Van a ser principalmente hormigón, acero activo y acero pasivo.

A continuación se muestran los consumos de materias primas en kg/m^2 (ver tablas 4.23 a 4.26) para las alternativas escogidas como óptimas según el criterio económico.

Alternativas óptimas para q = 5 KN/m^2					
Luz	Canto	Tipo solución	Consumo hormigón	Consumo acero activo	Consumo acero pasivo
4.0	150	PT	375	1.65	5.50
	150	ARM	375	-	11.91
	300	RET	480	-	13.47
6.4	150	PT	375	1.65	5.50
	150	ARM	375	-	11.91
	300	RET	480	-	13.47
8.0	200	ARM	500	-	24.65
	300	RET	480	-	18.20
	375	RET	612.5	-	16.69
12.0	300	PT	750	5.51	8.06
	300	ARM	750	-	42.57
	375	ARM	937.5	-	36.23

Tabla 4.23. Consumos materias primas de las alternativas óptimas económicamente para q = 5 KN/m^2

Alternativas óptimas para q = 10 KN/m^2					
Luz	Canto	Tipo solución	Consumo hormigón	Consumo acero activo	Consumo acero pasivo
4.0	150	PT	375	1.65	5.69
	150	ARM	375	-	11.84
	300	RET	480	-	13.47
6.4	200	PT	500	2.07	8.13
	300	RET	480	-	21.28
	375	RET	612.5	-	18.59
8.0	300	ARM	750	-	27.40
	300	RET	480	-	25.01
	375	RET	612.5	-	23.81
12.0	300	PT	750	8.27	11.56
	375	PT	937.5	6.43	12.03
	375	ARM	937.5	-	55.38

Tabla 4.24. Consumos materias primas de las alternativas óptimas económicamente para q = 10 KN/m^2

Alternativas óptimas para q = 15 KN/m^2					
Luz	Canto	Tipo solución	Consumo hormigón	Consumo acero activo	Consumo acero pasivo
4.0	150	PT	375	1.65	5.69
	150	ARM	375	-	17.23
	300	RET	480	-	13.47
6.4	200	PT	500	3.44	8.86
	300	RET	480	-	27.43
	375	RET	612.5	-	21.67
8.0	300	RET	480	-	36.69
	375	ARM	937.5	-	23.59
	375	RET	612.5	-	28.05
12.0					

Tabla 4.25. Consumos materias primas de las alternativas óptimas económicamente para q = 15 KN/m^2

Alternativas óptimas para q = 20 KN/m^2					
Luz	Canto	Tipo solución	Consumo hormigón	Consumo acero activo	Consumo acero pasivo
4.0	150	PT	375	1.65	6.62
	200	ARM	500	-	16.34
	300	RET	480	-	16.97
6.4	200	PT	500	4.48	10.08
	300	RET	480	-	32.14
	375	RET	612.5	-	27.77
8.0	300	PT	750	4.68	12.98
	300	RET	480	-	46.52
	375	RET	612.5	-	38.30
12.0					

Tabla 4.26. Consumos materias primas de las alternativas óptimas económicamente para q = 20 KN/m^2

4.2.3.2. Consumo de energía (agua y electricidad)

Otro criterio a valorar será el consumo de energía, reflejándose sobretodo en el consumo de agua y electricidad.

La dificultad de disponer de datos exactos sobre el consumo de agua y electricidad en una obra obliga a valorarlos mediante el uso de unos atributos (ver tabla 4.27) basados en uno criterios lo más objetivos posibles que no favorezcan ni perjudiquen ninguna de las alternativas

ATRIBUTO	PUNTUACIÓN
MUY BAJO (MB)	0
BAJO (B)	2
MODERADO (M)	5
ALTO (A)	8
MUY ALTO (MA)	10

Tabla 4.27. Puntuaciones asignadas a los atributos 'consumo de agua'

Partiendo de los atributos definidos en la tabla 4.27, en la tabla 4.28 se asigna una valoración [16] a cada una de las alternativas óptimas desde el punto de vista ambiental.

Se ha considerado que los consumos de agua varían en función del espesor del forjado y la tipología de solución. A más espesor mayor volumen de hormigón se requiere y esto conduce a un mayor gasto de agua para su elaboración. La tipología de forjado de hormigón pretensado, además, precisa de la inyección de los tendones. También hay un consumo de agua para la preparación de la lechada de inyección.

Para el consumo de electricidad se considerará el número de equipos necesarios para cada alternativa y su tiempo de uso [16]. Se usará el mismo criterio de valoración que en el caso del consumo de agua. En la tabla 4.29 se establecen las valoraciones referentes al consumo de electricidad de las alternativas.

Se ha considerado que los consumos de electricidad varían en función del tipo de forjado y espesor. La tipología de hormigón pretensado, además de requerir la misma electricidad que las otras para las tareas comunes, conllevan un consumo adicional por el uso de equipos eléctricos para el tesado y la inyección.

SOBRECARGA DE USO [KN/m^2]	LUZ [m]	ESPESOR [mm]	TIPO DE SOLUCIÓN	VALORACIÓN
5	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	8.0	200	ARM	M
		300	RET	M
		375	RET	A
	12.0	300	PT	MA
		300	ARM	A
		375	ARM	MA
10	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	ARM	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	12.0	300	PT	MA
		375	PT	MA
		375	ARM	MA
15	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	RET	M
		375	ARM	MA
		375	RET	A
20	4.0	150	PT	A
		200	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	PT	MA
		300	RET	M
		375	RET	A

Tabla 4.28. Valoración del atributo 'consumo de agua' de las alternativas óptimas económicamente

SOBRECARGA DE USO [KN/m^2]	LUZ [m]	ESPESOR [mm]	TIPO DE SOLUCIÓN	VALORACIÓN
5	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	8.0	200	ARM	M
		300	RET	M
		375	RET	A
	12.0	300	PT	MA
		300	ARM	A
		375	ARM	A
10	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	ARM	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	12.0	300	PT	MA
		375	PT	MA
		375	ARM	A
15	4.0	150	PT	A
		150	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	RET	M
		375	ARM	A
		375	RET	A
20	4.0	150	PT	A
		200	ARM	M
		300	RET	M
	6.4	200	PT	A
		300	RET	M
		375	RET	A
	8.0	300	PT	MA
		300	RET	M
		375	RET	A

Tabla 4.29. Valoración del atributo 'consumo de electricidad' de las alternativas óptimas económicamente

4.2.3.3 Generación de residuos en obra

La última cuestión a valorar será la generación de residuos en obra, que se puede clasificar en diversos tipos:

- Tierras
- Runa limpia: residuo de alto contenido en pétreos y bajo en materiales impropios que posteriormente se puede aprovechar para reciclar como áridos de hormigón.
- Runa normal: igual que el anterior pero de menor densidad debido a la mayor presencia de impropios. Ofrece una menor posibilidad de reciclaje.
- Runa sucia: la que tiene mayor presencia de impropios y se puede reciclar en un menor porcentaje.
- Madera
- Plásticos
- Cartón/papel
- Banales: desechos (todo lo que no se puede reciclar y debe ir al vertedero).

Se dispone de datos (ver tabla 4.30) de obras ejecutadas con forjados in situ, sólo hasta fase de estructura [16]. Se basará el siguiente apartado en la referencia citada para evaluar los residuos que generan las alternativas óptimas económicamente.

RESIDUOS (m^3)	
Contenido de tierra (1200 kg/ m^3)	9
Contenido de runa limpia (densidad superior a 1.45 T/ m^3)	9
Contenido de runa normal (densidad entre 1.25 y 1.45 T/ m^3)	0
Contenido de runa sucia (densidad entre 0.6 y 1.25 T/ m^3)	72
Contenido de madera (densidad entre 0.6 y 1.25 T/ m^3)	117
Contenido de plásticos (densidad entre 0.6 y 1.25 T/ m^3)	18
Contenido de cartón, papel (densidad entre 0.6 y 1.25 T/ m^3)	18
TOTAL	243
Superficie obra (m^2)	8000
RELACIÓN VOLUMEN RESIDUOS/SUP. OBRA (m^3/m^2)	**0.03**

Tabla 4.30. Volumen de residuos generados en una obra concreta, en fase de estructura

Para la generación de residuos se considera el tipo de obra y el espesor del forjado, estableciendo como valor máximo de producción de residuos el valor de 0.03 m^3/m^2 por ser el único dato de que se dispone sobre forjados ejecutados in situ. Se tomará este indicador (0,03 m^3/m^2) como el 100% y, a partir de aquí, se valorará (ver tabla 4.31) el resto de alternativas en relación con este valor máximo.

SOBRECARGA DE USO [KN/m^2]	LUZ [m]	ESPESOR [mm]	TIPO DE SOLUCIÓN	VALORACIÓN
5	4.0	150	PT	25%
		150	ARM	25%
		300	RET	75%
	6.4	150	PT	25%
		150	ARM	25%
		300	RET	75%
	8.0	200	ARM	25%
		300	RET	75%
		375	RET	75%
	12.0	300	PT	75%
		300	ARM	50%
		375	ARM	75%
10	4.0	150	PT	25%
		150	ARM	25%
		300	RET	75%
	6.4	200	PT	50%
		300	RET	75%
		375	RET	75%
	8.0	300	ARM	50%
		300	RET	75%
		375	RET	75%
	12.0	300	PT	75%
		375	PT	75%
		375	ARM	75%
15	4.0	150	PT	25%
		150	ARM	25%
		300	RET	75%
	6.4	200	PT	50%
		300	RET	75%
		375	RET	75%
	8.0	300	RET	75%
		375	ARM	75%
		375	RET	75%
20	4.0	150	PT	25%
		200	ARM	25%
		300	RET	75%
	6.4	200	PT	50%
		300	RET	75%
		375	RET	75%
	8.0	300	PT	75%
		300	RET	75%
		375	RET	75%

Tabla 4.31. Valoración del atributo 'generación de residuos en obra' en porcentajes de las alternativas óptimas económicamente

Para el análisis global final se necesitaran estas evaluaciones sin unidades, como valores entre 0 y 1. Consecuentemente en la tabla 4.32 se adimensionalizan las valoraciones de la tabla 4.31

SOBRECARGA DE USO [KN/m^2]	LUZ [m]	ESPESOR [mm]	TIPO DE SOLUCIÓN	VALORACIÓN
5	4.0	150	PT	0.75
		150	ARM	0.75
		300	RET	2.25
	6.4	150	PT	0.75
		150	ARM	0.75
		300	RET	2.25
	8.0	200	ARM	0.75
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25
	12.0	300	PT	2.25
		300	ARM	1.50
		375	ARM	2.25
10	4.0	150	PT	0.75
		150	ARM	0.75
		300	RET	2.25
	6.4	200	PT	1.50
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25
	8.0	300	ARM	1.50
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25
	12.0	300	PT	2.25
		375	PT	2.25
		375	ARM	2.25
15	4.0	150	PT	0.75
		150	ARM	0.75
		300	RET	2.25
	6.4	200	PT	1.50
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25
	8.0	300	RET	2.25
		375	ARM	2.25
		375	RET	2.25
20	4.0	150	PT	0.75
		200	ARM	0.75
		300	RET	2.25
	6.4	200	PT	1.50
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25
	8.0	300	PT	2.25
		300	RET	2.25
		375	RET	2.25

Tabla 4.32. Valoración del atributo 'generación de residuos en obra' en valores adimensionales de las alternativas óptimas económicamente

4.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN MIVES

Tras la presentación y evaluación de los requerimientos para el análisis de sostenibilidad, se requerirá un método de análisis de alternativas que tenga en cuenta la importancia relativa que tienen unos criterios sobre otros y nos permita obtener un resultado fiable y real para poder tomar la decisión adecuada. Así, se ha elegido para

esta tesina el método basado en el programa MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible) [16]. Se presenta a continuación el esquema que se ha seguido para aplicar el método.

4.3.1 Estructuración del modelo jerárquico

En esta primera etapa se debe desglosar el problema en sus componentes relevantes. En una jerarquía funcional, los sistemas complejos se descomponen en sus partes constituyentes, de acuerdo con sus relaciones esenciales. Cuando construimos una jerarquía se deben incluir suficientes detalles relevantes para describir el problema de la forma más completa posible. Para lograr esto se debe realizar un análisis de los elementos constituyentes del problema así como de sus relaciones causales.

Los pasos a seguir para la estructuración del problema jerárquico son:

- Identificación del problema
- Definición de objetivo
- Identificación de criterios y subcriterios
- Identificación de alternativas factibles

En este caso el modelo jerárquico quedaría estructurado según la figura 4.6.

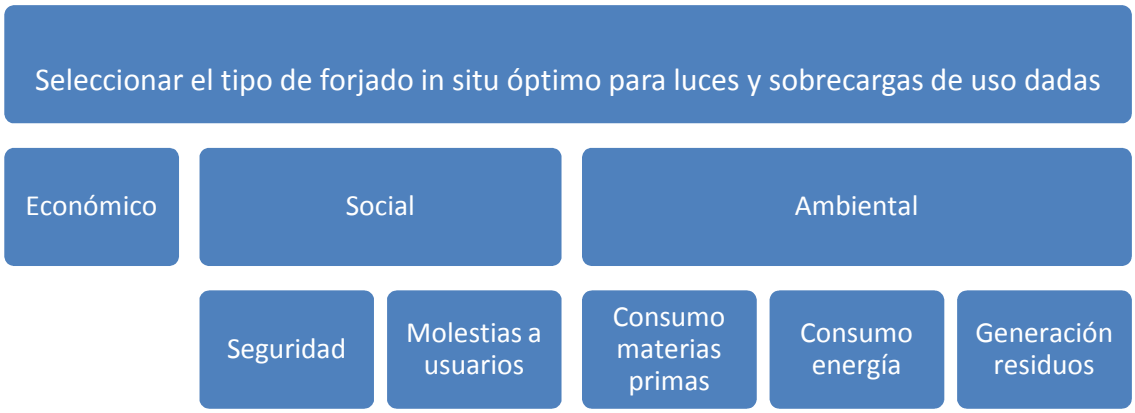

Figura 4.6. Estructuración del modelo jerárquico de MIVES

4.3.2 Emisión de los juicios y las evaluaciones

En esta segunda etapa se evalúan los criterios y subcriterios por medio de comparaciones binarias. Aquí se expresan las preferencias asignando un valor numérico a cada comparación. El programa MIVES hace uso del método AHP, un Proceso de Jerarquía Analítica que dispone de su propia escala creada por Saaty (1980) (ver tabla 4.33) [16]. Ésta mide los juicios emitidos por quien decide las preferencias.

Estos juicios pueden ser emitidos, por ejemplo, por especialistas en el área involucrada. También pueden reflejar la opinión de un grupo de personas. En este caso, se debería realizar un promedio geométrico de todas las opiniones emitidas por los miembros del grupo

En base a este juicio elegido, se construye una matriz de comparación por pares para cada criterio y subcriterio establecidos.

ESCALA NUMÉRCIA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1.0	Ambos elementos son de igual importancia.	Ambos elementos contribuyen con la propiedad en igual forma.
3.0	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento sobre el otro.
5.0	Fuerte importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es fuertemente favorecido.
7.0	Muy fuerte importancia de un extremo sobre otro.	Un elemento es muy fuertemente dominante.
9.0	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	Un elemento es favorecido, por lo menos con un orden da magnitud de diferencia.
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios.
Incrementos de 0,1	Valores intermedios en la graduación más fina de 0.1	Usados como graduaciones más finas de los juicios.

Tabla 4.33. Escala de valoración propuesta por Saaty [16]

Los autovalores de la matriz de comparación por pares son los pesos relativos de cada uno de los criterios o subcriterios dentro de los factores que se están comparando en la matriz. En la tabla 4.34 se indican los pesos que se van a utilizar para los requerimientos. Para los pesos de los subcriterios ver tabla 4.35 y 4.36 y para los de los indicadores relacionados con el subcriterio ver tabla 4.37 y 4.38.

	ECONÓMICO	SOCIAL	AMBIENTAL	PESO (%)
ECONÓMICO	1.00	9.00	5.00	**75.72**
SOCIAL	0.11	1.00	0.50	**8.13**
AMBIENTAL	0.20	2.00	1.00	**16.15**

Tabla 4.34. Matriz de pesos de los criterios (económico, social, ambiental) [16]

	SEGURIDAD	MOLESTIAS	PESO (%)
SEGURIDAD	1,00	3.0	**75.00**
MOLESTIAS	0.33	1,00	**25.00**

Tabla 4.35. Matriz de pesos de los sub-criterios relacionados con el criterio social [16]

	CONSUMO MATERIAS PRIMAS	CONSUMO ENERGÍA	GENERACIÓN DE RESIDUOS	PESO (%)
CONSUMO MATERIAS PRIMAS	1.00	1.50	0.50	**27.27**
CONSUMO ENERGÍA	0.67	1.00	0.33	**18.18**
GENERACIÓN DE RESIDUOS	2.00	3.00	1.00	**54.54**

Tabla 4.36. Matriz de pesos de los sub-criterios relacionados con el criterio ambiental [16]

	HORMIGÓN	ACERO	PESO (%)
HORMIGÓN	1.00	0.75	**42.89**
ACERO	1.33	1.00	**57.11**

Tabla 4.37. Matriz de pesos de indicadores relacionados con el sub-criterio de consumo de materias primas [16]

	AGUA	ELECTRICIDAD	PESO (%)
AGUA	1.0	1.0	**50.00**
ELECTRICIDAD	1.0	1.0	**50.00**

Tabla 4.38. Matriz de pesos de indicadores relacionados con el sub-criterio de consumo de energía [16]

4.3.3 Desarrollo del vector de prioridad global

Tras evaluar los indicadores de sostenibilidad y establecer las ponderaciones para cada uno de ellos, se sigue la siguiente metodología:

- Establecer los vectores de valores equivalentes acotando unos rangos mínimo y máximo que dependerán de los valores obtenidos para cada subcriterio.
- Plasmar dichos valores en funciones lineales que los transformaran en valores comprendidos entre 0 y 1. Se tomará el valor 0 como la peor puntuación del criterio y el valor 1 como la mejor.
- Aplicar sobre estos valores entre 0 y 1 las distintas ponderaciones desde el peso del indicador del subcriterio hasta el peso del indicador del requerimiento, en esta dirección.
- Se obtienen, para los parámetros luz y carga, los vectores de prioridad global del método de evaluación.

Se elegirán las funciones lineales para evitar influir inconscientemente en el resultado con otro tipo de gráficas que favorezcan unas alternativas frente a otras.

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En aras de obtener el vector de prioridad global, se presentarán a continuación todos los vectores de valor equivalente (con los rangos mínimos y máximos) y los vectores de prioridad global para las combinaciones de luz y cargas aplicadas a las alternativas óptimas económicamente.

5.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En las tablas 5.1 y 5.2 y figura 5.1 se presenta para L = 4 m y q = 5 KN/m^2.

L = 4.0 m; q = 5 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	27.32	21.34	26.93	**20**	**30**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	375	375	480	**350**	**500**
		Acero activo (kg/m^2)	1.65	0	0	**0**	**2**
		Acero pasivo (kg/m^2)	5.50	11.91	13.47	**5**	**14**
	Consumo energía	Agua	8	5	5	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	5	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	0.75	0.75	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.1. Rangos de los indicadores para L = 4 m y q = 5 KN/m^2

L = 4.0 m; q = 5 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm
Económico	0.27	0.87	0.31	**35.0%**	**82.2%**	**33.7%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.72	0.79	0.41			

Tabla 5.2. Vector de prioridad global para L = 4 m y q = 5 KN/m^2

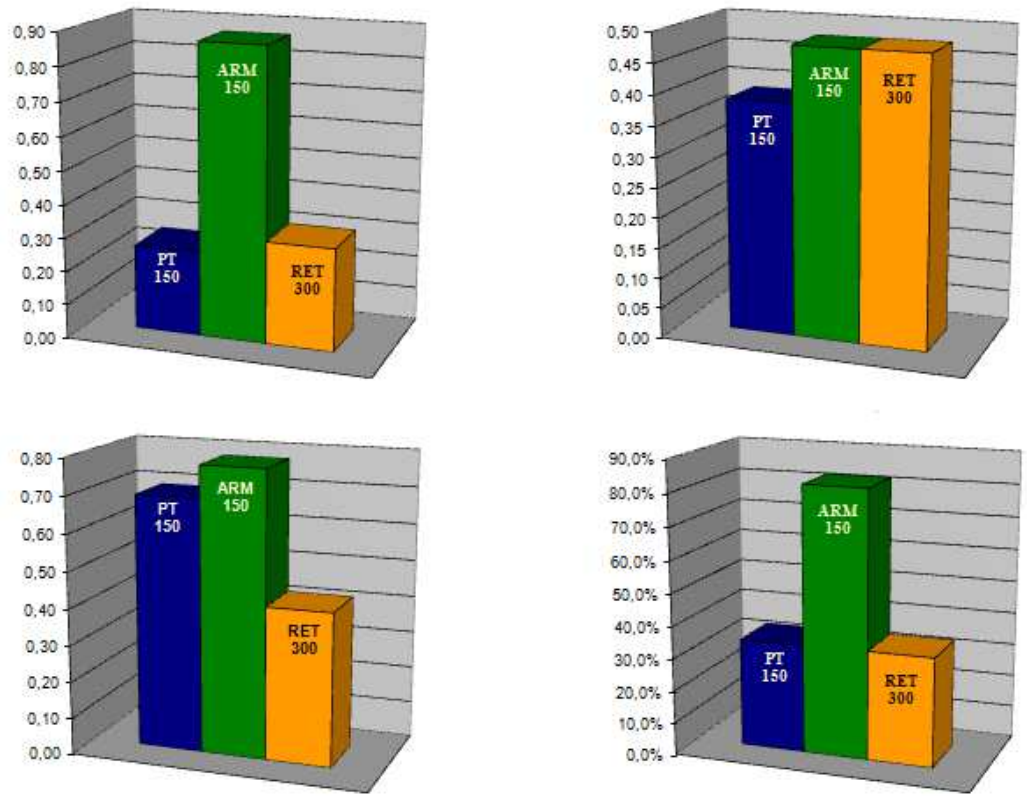

Figura 5.1. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 4 m y q = 5 KN/m^2

En las tablas 5.3 y 5.4 y figura 5.2 se presenta para L = 4 m y q = 10 KN/m^2.

L = 4.0 m; q = 10KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	27.45	21.30	26.93	**20**	**30**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	375	375	480	**300**	**500**
		Acero activo (kg/m^2)	1.65	0	0	**0**	**2**
		Acero pasivo (kg/m^2)	5.69	11.84	13.47	**5**	**15**
	Consumo energía	Agua	8	5	5	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	5	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	0.75	0.75	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.3. Rangos de los indicadores para L = 4 m y q = 10 KN/m^2

L = 4.0 m; q = 10KN/m^2						
CRITERIO	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm
Económico	0.26	0.87	0.31	**33.6%**	**82.3%**	**33.9%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.69	0.78	0.42			

Tabla 5.4. Vector de prioridad global para L = 4 m y q = 10 KN/m^2

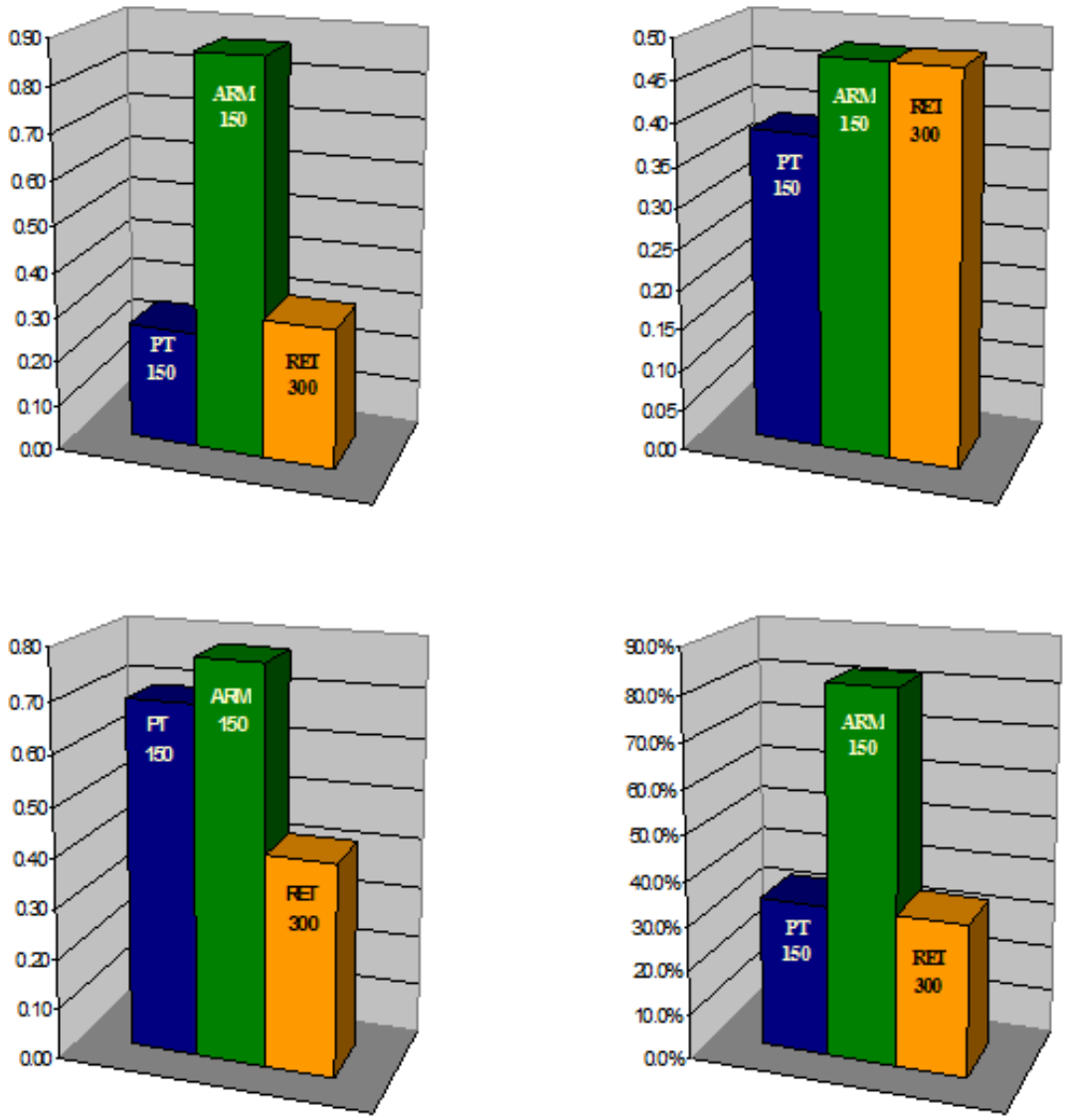

Figura 5.2. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 4 m y q = 10 KN/m^2

En las tablas 5.5 y 5.6 y figura 5.3 se presenta para L = 4 m y q = 15 KN/m^2.

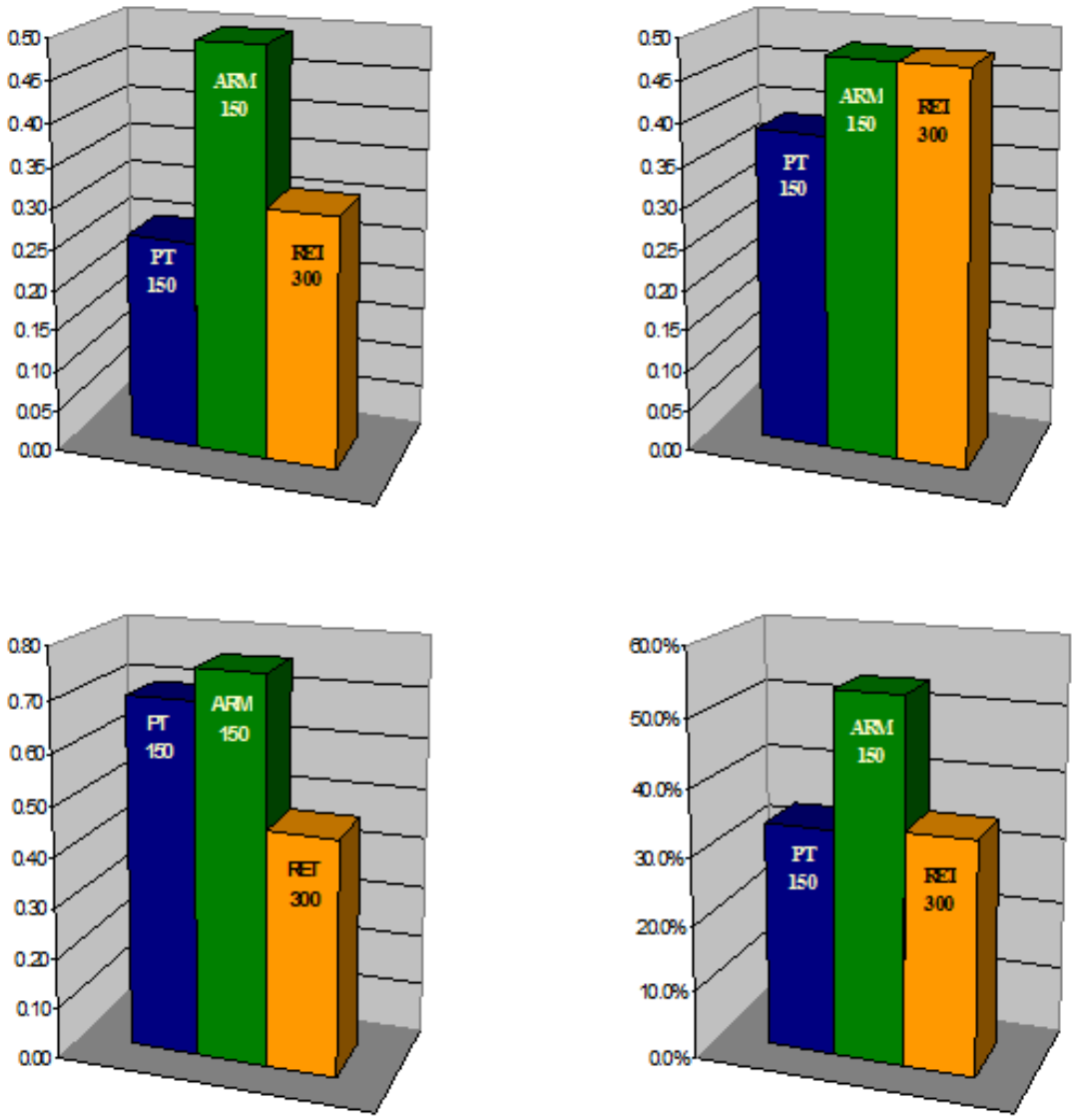

Figura 5.3. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 4 m y q = 15 KN/m²

L = 4.0 m; q = 15KN/m²							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m²	27.45	25.03	26.93	**20**	**30**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m²)	375	375	480	**300**	**500**
		Acero activo (kg/m²)	1.65	0	0	**0**	**2**
		Acero pasivo (kg/m²)	5.69	17.23	13.47	**5**	**20**
	Consumo energía	Agua	8	5	5	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	5	**0**	**10**
	Residuos	m³/m²	0.75	0.75	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.5. Rangos de los indicadores para L = 4 m y q = 15 KN/m²

L = 4.0 m; q = 15KN/m^2						
CRITERIO	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm	POST. 150mm	ARM. 150mm	RET. 300mm
Económico	0.26	0.50	0.31	**33.7%**	**53.7%**	**34.6%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.69	0.76	0.46			

Tabla 5.6. Vector de prioridad global para L = 4 m y q = 15 KN/m^2

En las tablas 5.7 y 5.8 y figura 5.4 se presenta para L = 4 m y q = 20 KN/m^2.

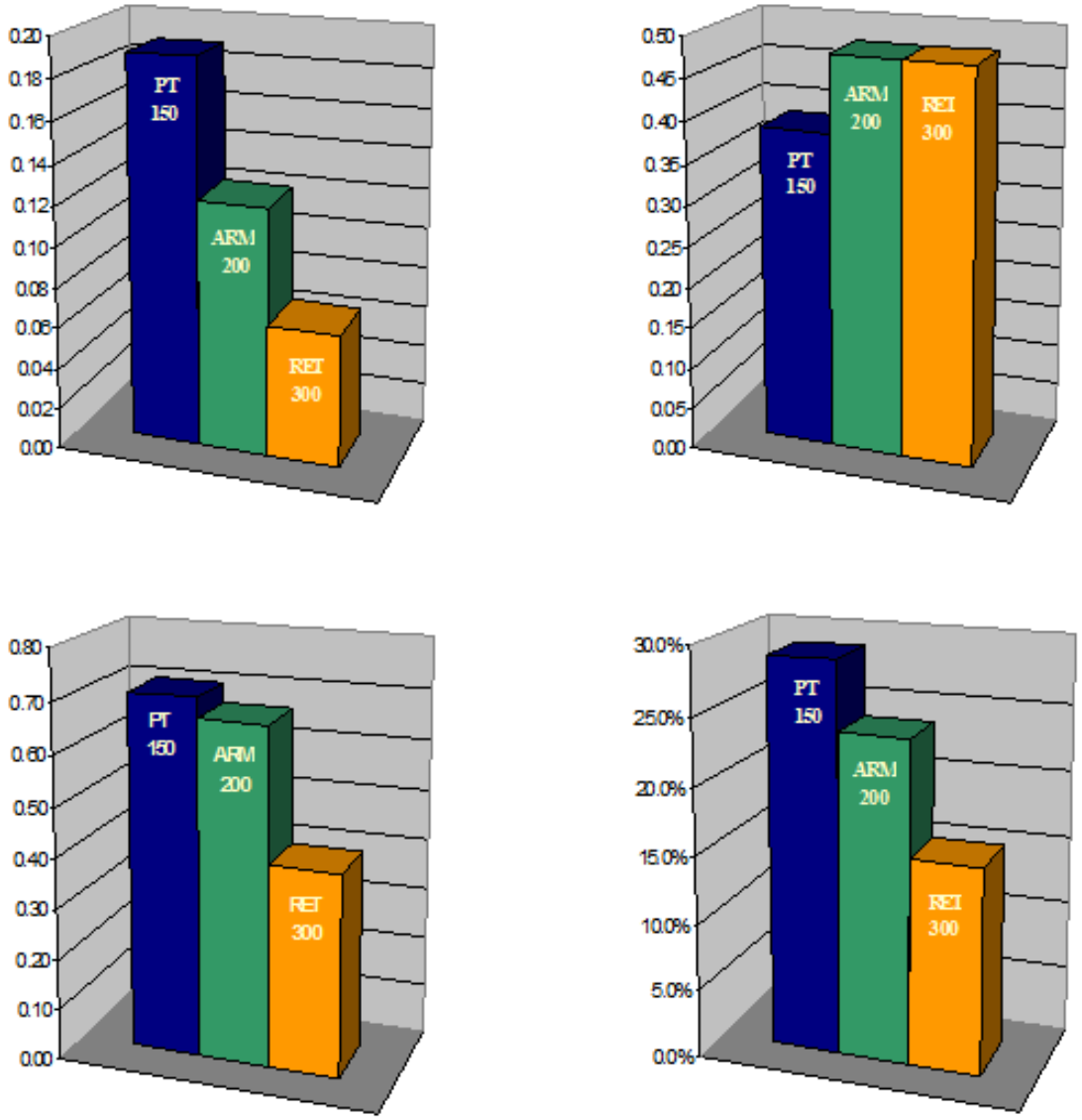

Figura 5.4. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 4 m y q = 20 KN/m^2

L = 4.0 m; q = 20 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 150mm	ARMADA 200mm	RETICULAR 300mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	28.10	28.78	29.35	**20**	**30**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	375	500	480	**350**	**500**
		Acero activo (kg/m^2)	1.65	0	0	**0**	**2**
		Acero pasivo (kg/m^2)	6.62	16.34	16.97	**5**	**17**
	Consumo energía	Agua	8	5	5	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	5	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	0.75	0.75	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.7. Rangos de los indicadores para L = 4 m y q = 20 KN/m^2

L = 4.0 m; q = 20 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 150mm	ARMADA 200mm	RETICULAR 300mm	POST. 150mm	ARMADA 200mm	RETICULAR 300mm
Económico	0.19	0.12	0.06	**28.9%**	**23.8%**	**15.2%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.70	0.66	0.40			

Tabla 5.8. Vector de prioridad global para L = 4 m y q = 20 KN/m^2

En las tablas 5.9 y 5.10 y figura 5.5 se presenta para L = 6.4 m y q = 5 KN/m^2.

L = 6.4 m; q = 5 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	28.13	27.55	27.74	**20**	**30**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	375	375	480	**350**	**500**
		Acero activo (kg/m^2)	1.65	0	0	**0**	**2**
		Acero pasivo (kg/m^2)	5.50	11.91	13.47	**5**	**14**
	Consumo energía	Agua	8	5	5	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	5	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	0.75	0.75	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.9. Rangos de los indicadores para L = 6.4 m y q = 5 KN/m^2

L = 6.4 m; q = 5 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm	POST. 150mm	ARMADA 150mm	RETICULAR 300mm
Económico	0.19	0.25	0.23	**28.9%**	**35.2%**	**27.6%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.72	0.79	0.41			

Tabla 5.10. Vector de prioridad global para L = 6.4 m y q = 5 KN/m^2

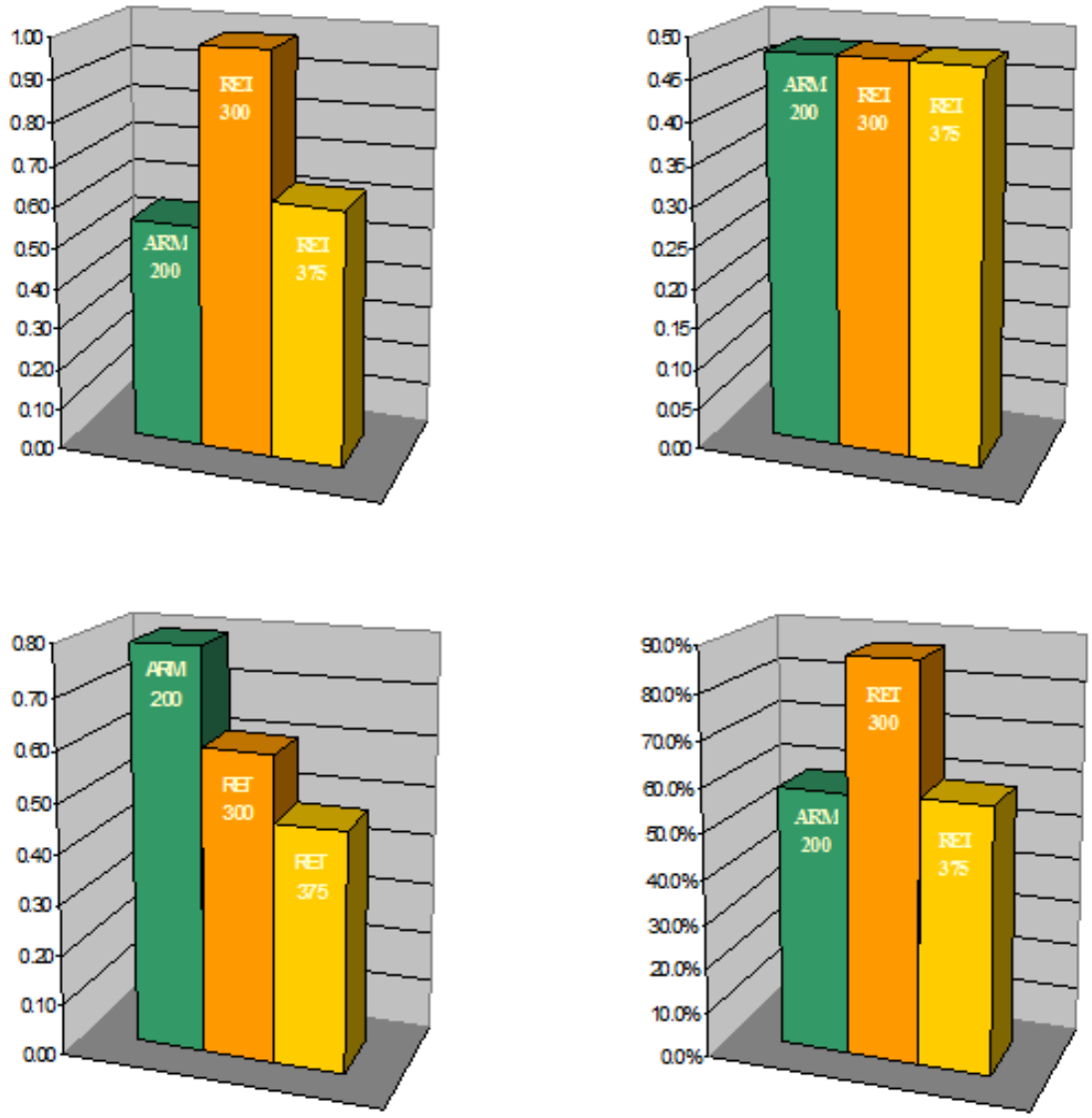

Figura 5.5. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 6.4 m y q = 5 KN/m^2

En las tablas 5.11 y 5.12 y figura 5.6 se presenta para L = 6.4 m y q = 10 KN/m^2.

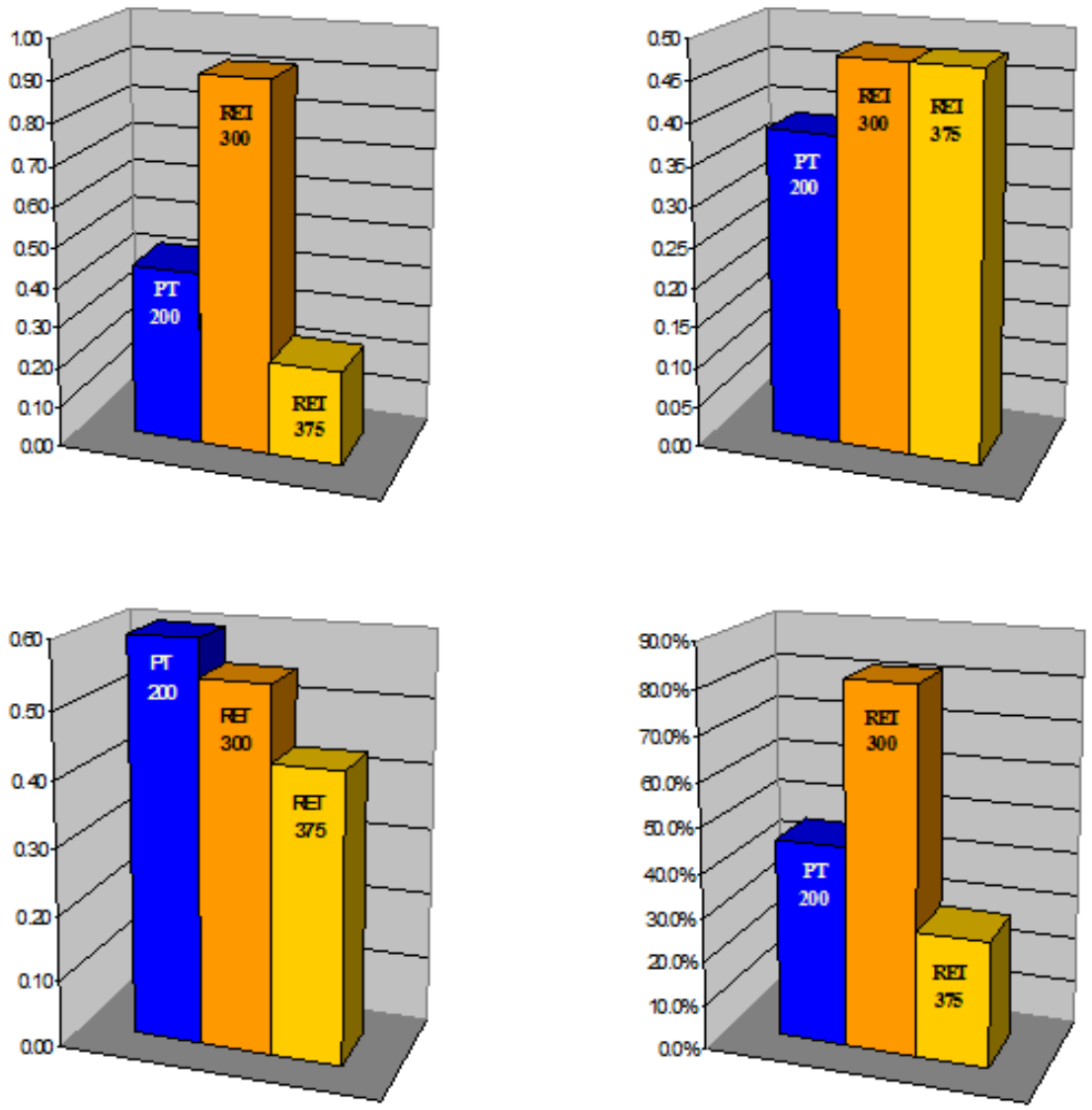

Figura 5.6. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 6.4 m y q = 10 KN/m²

L = 6.4 m; q = 10 KN/m²							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m²	34.28	32.34	35.07	**32**	**36**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m²)	500	480	612.5	**450**	**650**
		Acero activo (kg/m²)	2.07	0	0	**0**	**3**
		Acero pasivo (kg/m²)	8.13	21.28	18.59	**8**	**30**
	Consumo energía	Agua	8	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m³/m²	1.5	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.11. Rangos de los indicadores para L = 6.4 m y q = 10 KN/m²

L = 6.4 m; q = 10 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm
Económico	0.43	0.91	0.23	**45.4%**	**82.0%**	**28.4%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.60	0.54	0.43			

Tabla 5.12. Vector de prioridad global para L = 6.4 m y q = 10 KN/m^2

En las tablas 5.13 y 5.14 y figura 5.7 se presenta para L = 6.4 m y q = 15 KN/m^2.

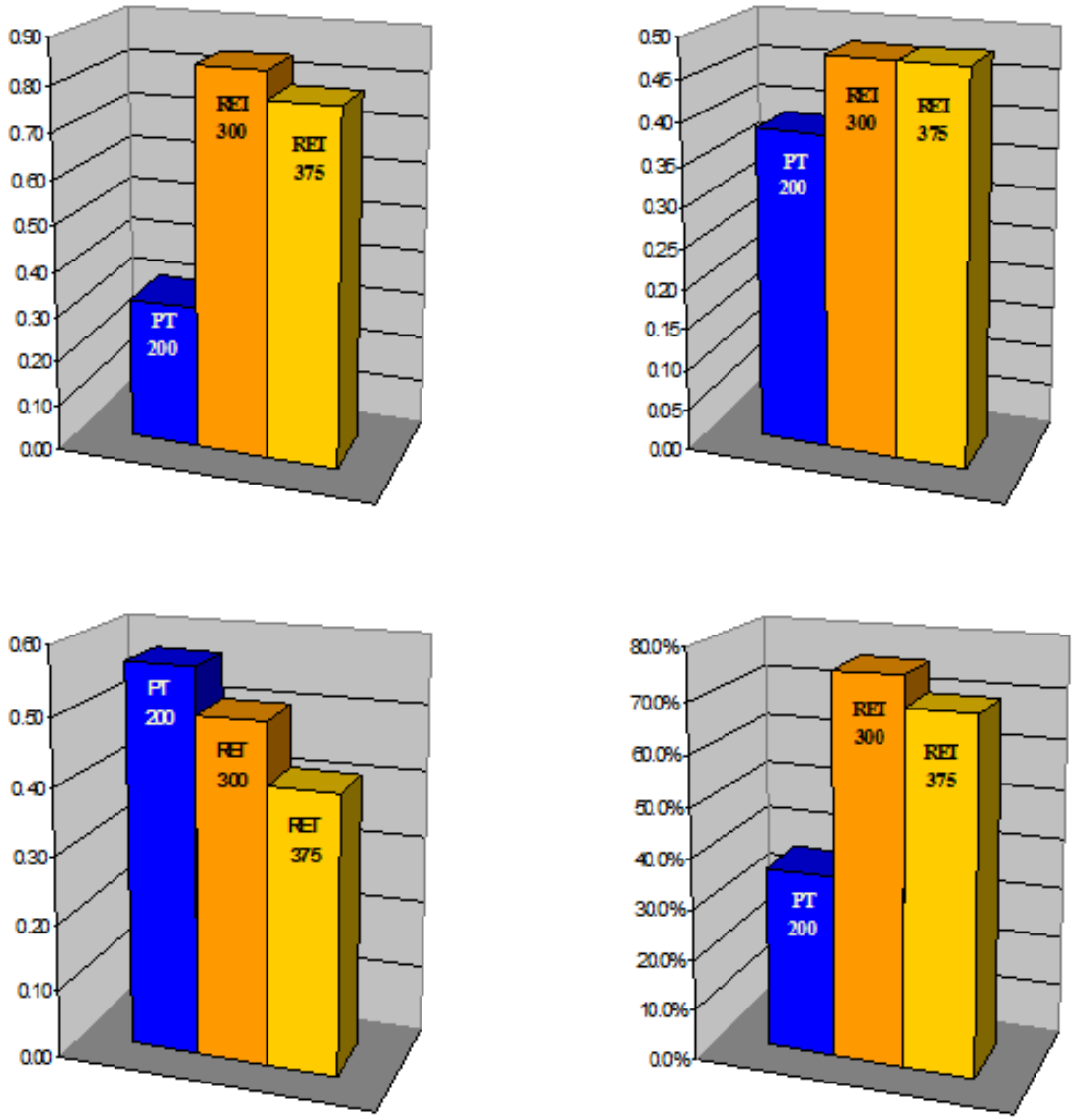

Figura 5.7. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 6.4 m y q = 15 KN/m^2

L = 6.4 m; q = 15 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	41.88	36.60	37.21	**35**	**45**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	500	480	612.5	**450**	**650**
		Acero activo (kg/m^2)	3.44	0	0	**0**	**4**
		Acero pasivo (kg/m^2)	8.86	27.43	21.67	**8**	**30**
	Consumo energía	Agua	8	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	1.5	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.13. Rangos de los indicadores para L = 6.4 m y q = 15 KN/m^2

L = 6.4 m; q = 15 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm	POST. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm
Económico	0.31	0.84	0.78	**35.9%**	**75.6%**	**69.5%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.57	0.50	0.41			

Tabla 5.14. Vector de prioridad global para L = 6.4 m y q = 15 KN/m^2

En las tablas 5.15 y 5.16 y figura 5.8 se presenta para L = 6.4 m y q = 20 KN/m^2.

L = 6.4 m; q = 20 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 200mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	48.06	39.86	41.43	**30**	**50**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	500	480	612.5	**450**	**620**
		Acero activo (kg/m^2)	4.48	0	0	**0**	**5**
		Acero pasivo (kg/m^2)	10.08	32.14	27.77	**10**	**35**
	Consumo energía	Agua	8	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	1.5	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.15. Rangos de los indicadores para L = 6.4 m y q = 20 KN/m^2

L = 6.4 m; q = 20 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 200mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm	POST. 200mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm
Económico	0.10	0.51	0.43	**19.6%**	**50.3%**	**42.4%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.56	0.50	0.38			

Tabla 5.16. Vector de prioridad global para L = 6.4 m y q = 20 KN/m^2

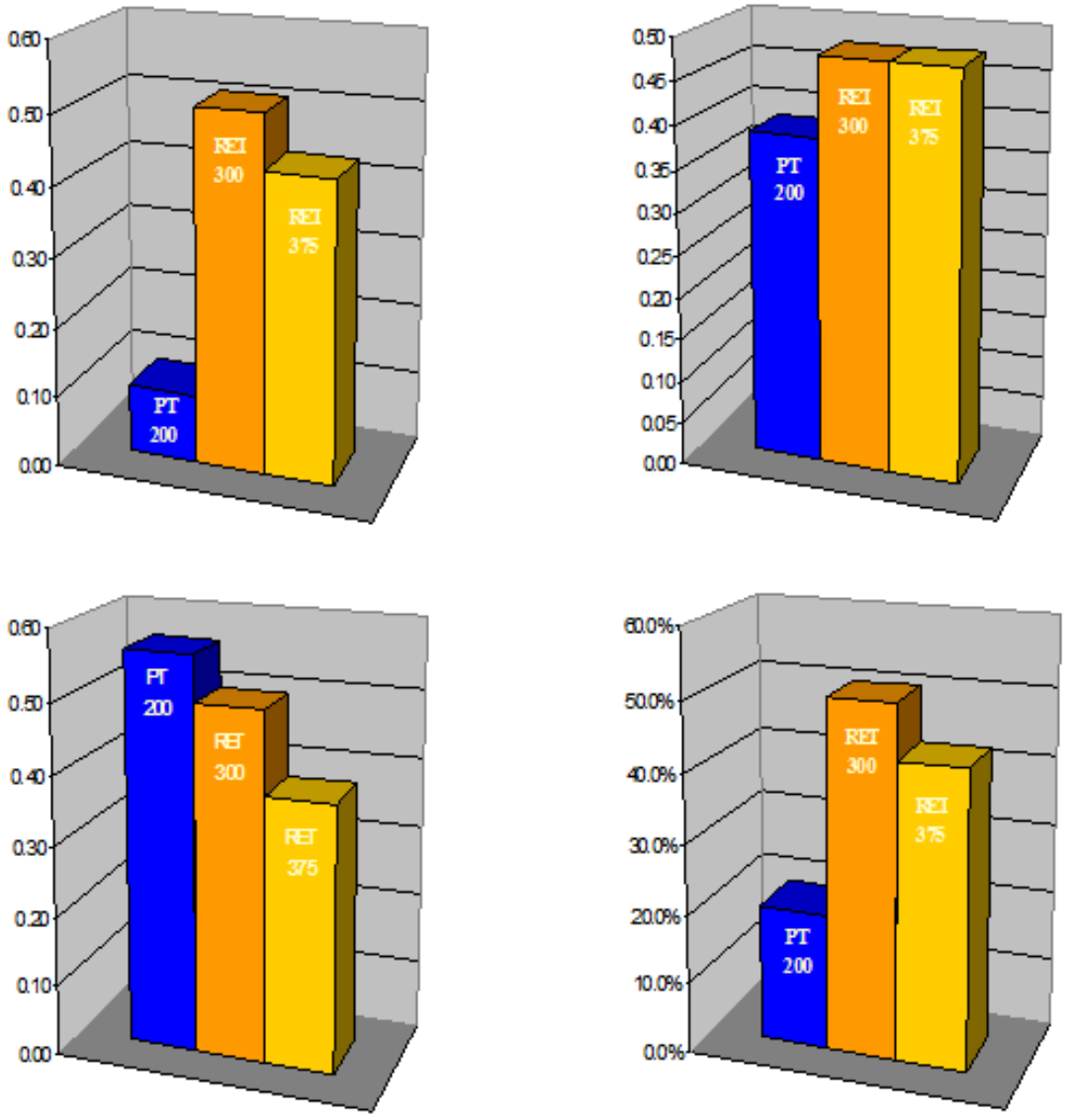

Figura 5.8. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 6.4 m y q = 20 KN/m^2

En las tablas 5.17 y 5.18 y figura 5.9 se presenta para L = 8 m y q = 5 KN/m^2.

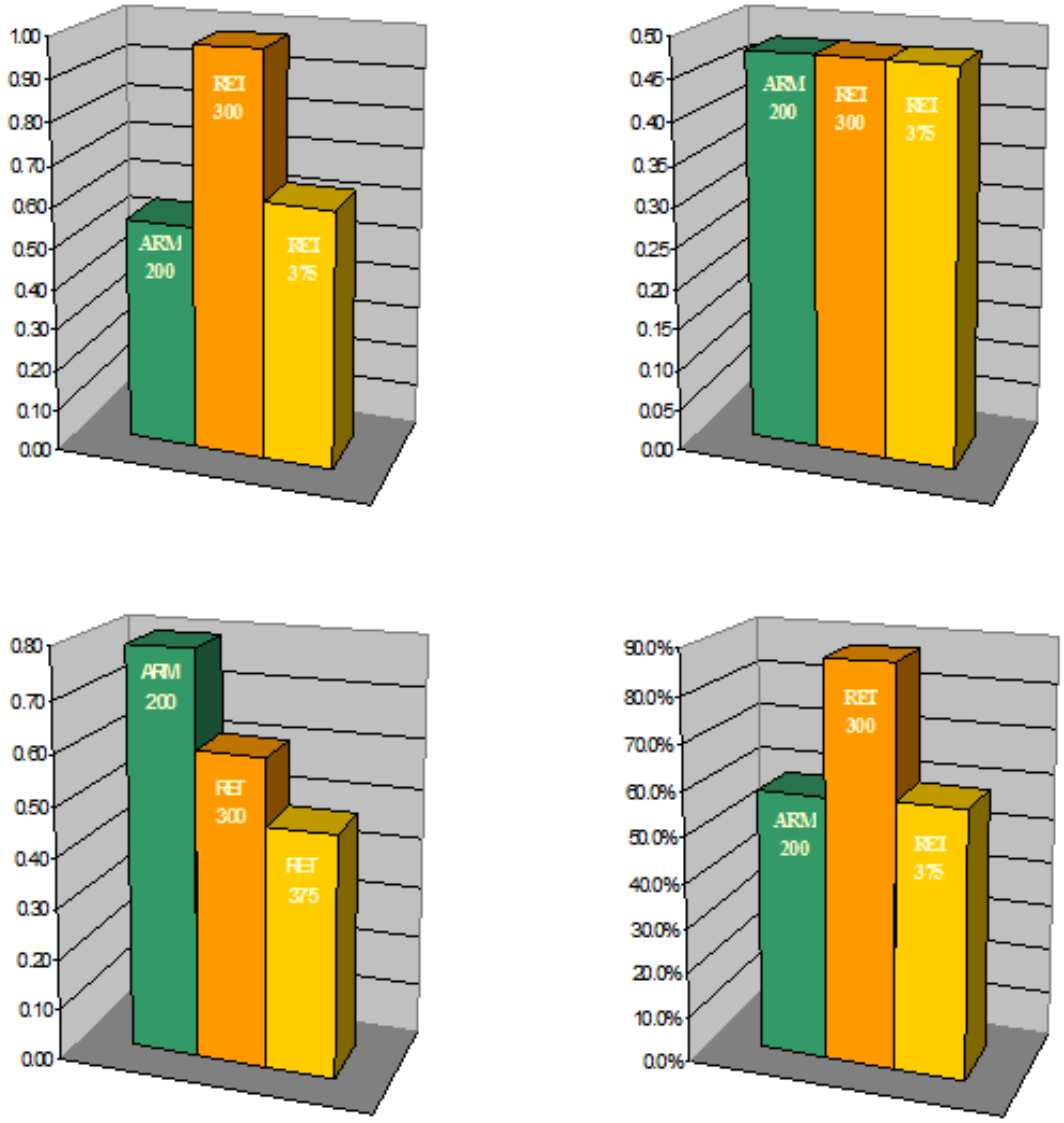

Figura 5.9. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 8.0 m y q = 5 KN/m²

L = 8.0 m; q = 5 KN/m²							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	ARM. 200mm	RET. 300mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m²	34.53	30.20	33.75	**30**	**40**
Social	Seguridad	Atributos	74	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	12	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m²)	500	480	612.5	**450**	**620**
		Acero activo (kg/m²)	0	0	0	**0**	**5**
		Acero pasivo (kg/m²)	24.65	18.20	16.69	**15**	**30**
	Consumo energía	Agua	5	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	5	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m³/m²	0.75	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.17. Rangos de los indicadores para L = 8.0 m y q = 5 KN/m²

L = 8.0 m; q = 5 KN/m^2						
CRITERIO	ARM. 200mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm	ARM. 200mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm
Económico	0.55	0.98	0.63	**58.1%**	**87.8%**	**58.8%**
Social	0.48	0.48	0.48			
Ambiental	0.79	0.60	0.47			

Tabla 5.18. Vector de prioridad global para L = 8.0 m y q = 5 KN/m^2

En las tablas 5.19 y 5.20 y figura 5.10 se presenta para L = 8 m y q = 10 KN/m^2.

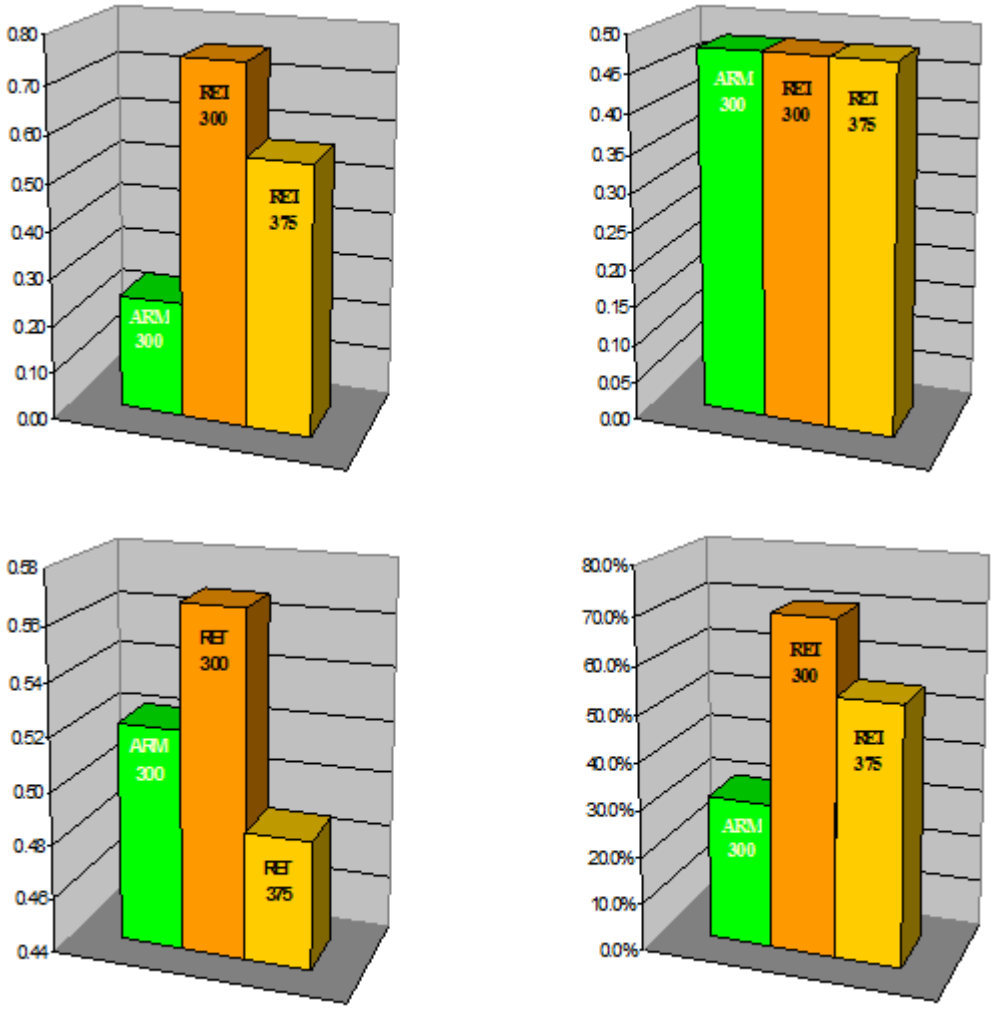

Figura 5.10. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 8.0 m y q = 10 KN/m^2

L = 8 m; q = 10 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	ARM. 300mm	RET. 300mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	45.17	34.92	38.69	**30**	**50**
Social	Seguridad	Atributos	74	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	12	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	750	480	612.5	**450**	**800**
		Acero activo (kg/m^2)	0	0	0	**0**	**1**
		Acero pasivo (kg/m^2)	27.40	25.01	23.81	**20**	**30**
	Consumo energía	Agua	8	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	8	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	1.5	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.19. Rangos de los indicadores para L = 8.0 m y q = 10 KN/m^2

L = 8.0 m; q = 10 KN/m^2						
CRITERIO	ARM. 300mm	RET. 300mm	RET. 375mm	ARM. 300mm	RET. 300mm	RET. 375mm
Económico	0.24	0.75	0.57	**30.6%**	**70.1%**	**54.6%**
Social	0.48	0.48	0.48			
Ambiental	0.52	0.57	0.49			

Tabla 5.20. Vector de prioridad global para L = 8.0 m y q = 10 KN/m^2

En las tablas 5.21 y 5.22 y figura 5.11 se presenta para L = 8 m y q = 15 KN/m^2.

L = 8.0 m; q = 15 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	RET. 300mm	ARM. 375mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	43.02	49.08	41.63	**40**	**52**
Social	Seguridad	Atributos	74	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	12	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	480	937.5	612.5	**450**	**1000**
		Acero activo (kg/m^2)	0	0	0	**0**	**1**
		Acero pasivo (kg/m^2)	36.69	23.59	28.05	**20**	**40**
	Consumo energía	Agua	5	10	8	**0**	**10**
		Electricidad	5	8	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	2.25	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.21. Rangos de los indicadores para L = 8.0 m y q = 15 KN/m^2

L = 8.0 m; q = 15 KN/m^2						
CRITERIO	RET. 300mm	ARM. 375mm	RET. 375mm	RET. 300mm	ARM. 375mm	RET. 375mm
Económico	0.75	0.24	0.86	**68.9%**	**29.6%**	**77.5%**
Social	0.48	0.48	0.48			
Ambiental	0.52	0.45	0.50			

Tabla 5.22. Vector de prioridad global para L = 8.0 m y q = 15 KN/m^2

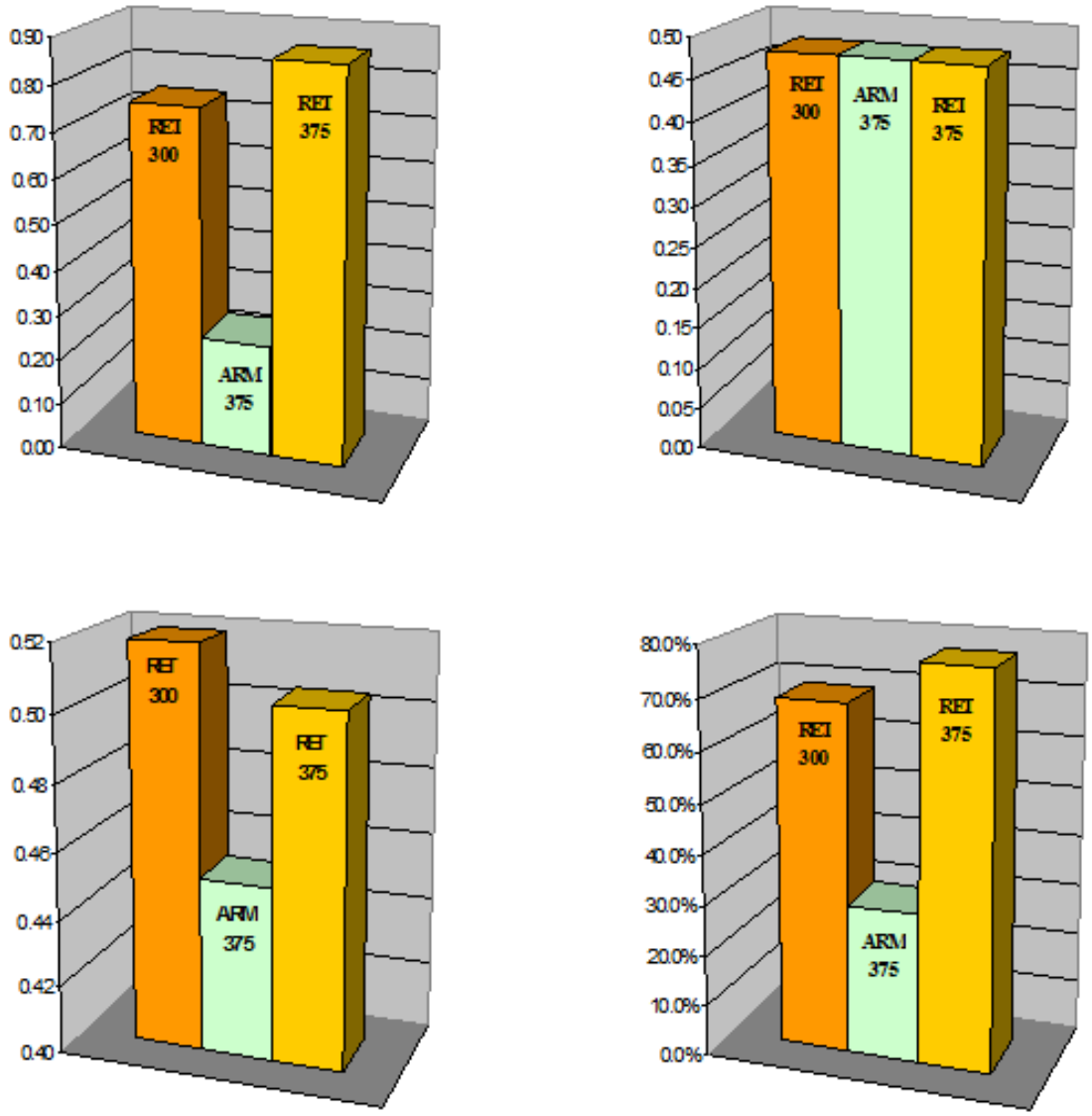

Figura 5.11. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 8.0 m y q = 15 KN/m^2

En las tablas 5.23 y 5.24 y figura 5.12 se presenta para L = 8 m y q = 20 KN/m^2.

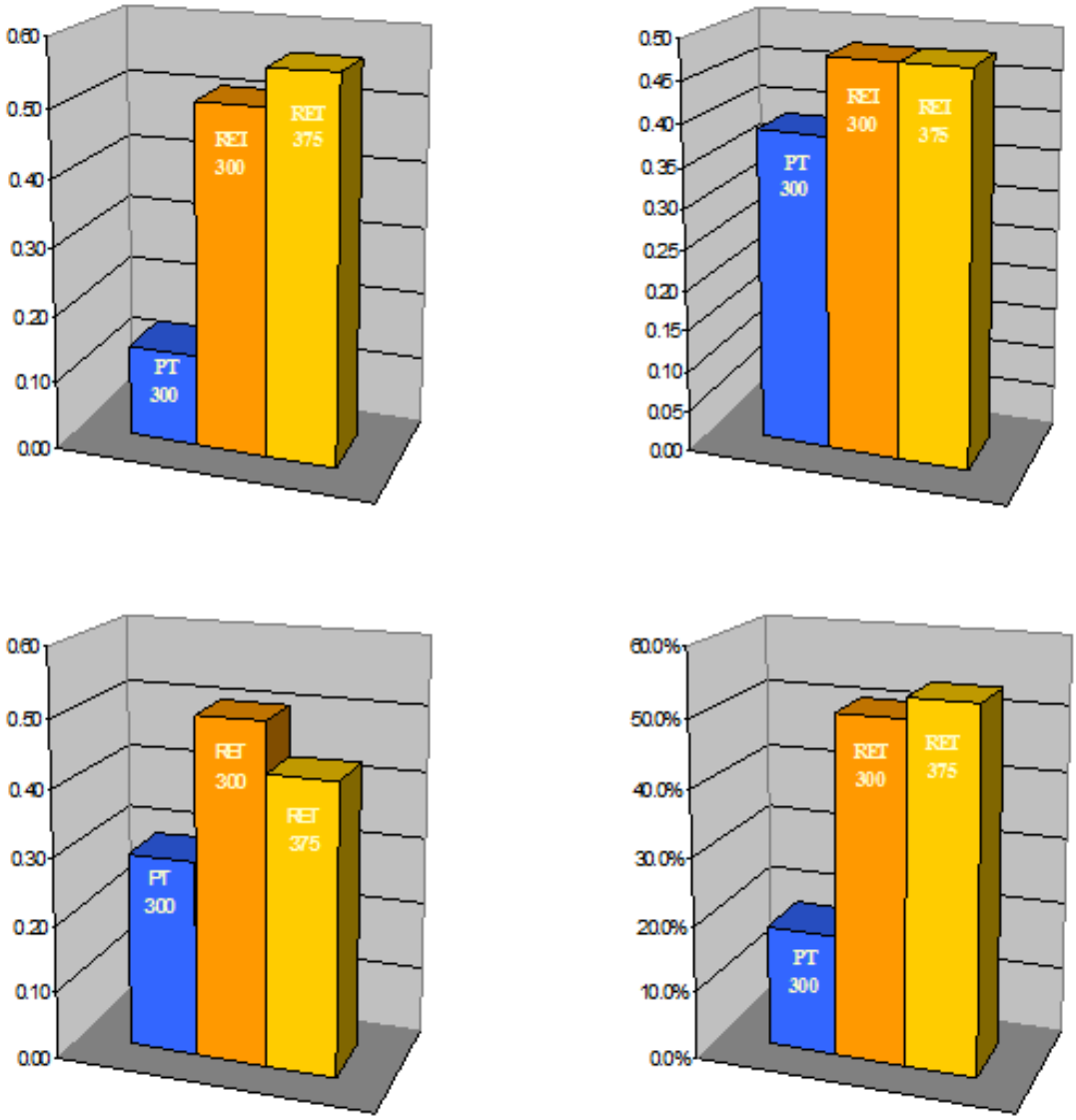

Figura 5.12. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 8.0 m y q = 20 KN/m²

L = 8.0 m; q = 20 KN/m²							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 300mm	RET. 300mm	RET. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m²	57.30	49.83	48.73	**40**	**60**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m²)	750	480	612.5	**450**	**750**
		Acero activo (kg/m²)	4.68	0	0	**0**	**5**
		Acero pasivo (kg/m²)	12.92	46.52	38.30	**10**	**50**
	Consumo energía	Agua	10	5	8	**0**	**10**
		Electricidad	10	5	8	**0**	**10**
	Residuos	m³/m²	2.25	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.23. Rangos de los indicadores para L = 8.0 m y q = 20 KN/m²

Luz = 8m; Sobrecarga de uso = 20KN/m^2						
CRITERIO	POST. 300mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm	POST. 300mm	RETICULAR 300mm	RETICULAR 375mm
Económico	0.14	0.51	0.56	**18.0%**	**50.5%**	**53.5%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.29	0.50	0.43			

Tabla 5.24. Vector de prioridad global para L = 8.0 m y q = 20 KN/m^2

En las tablas 5.25 y 5.26 y figura 5.13 se presenta para L = 12 m y q = 5 KN/m^2.

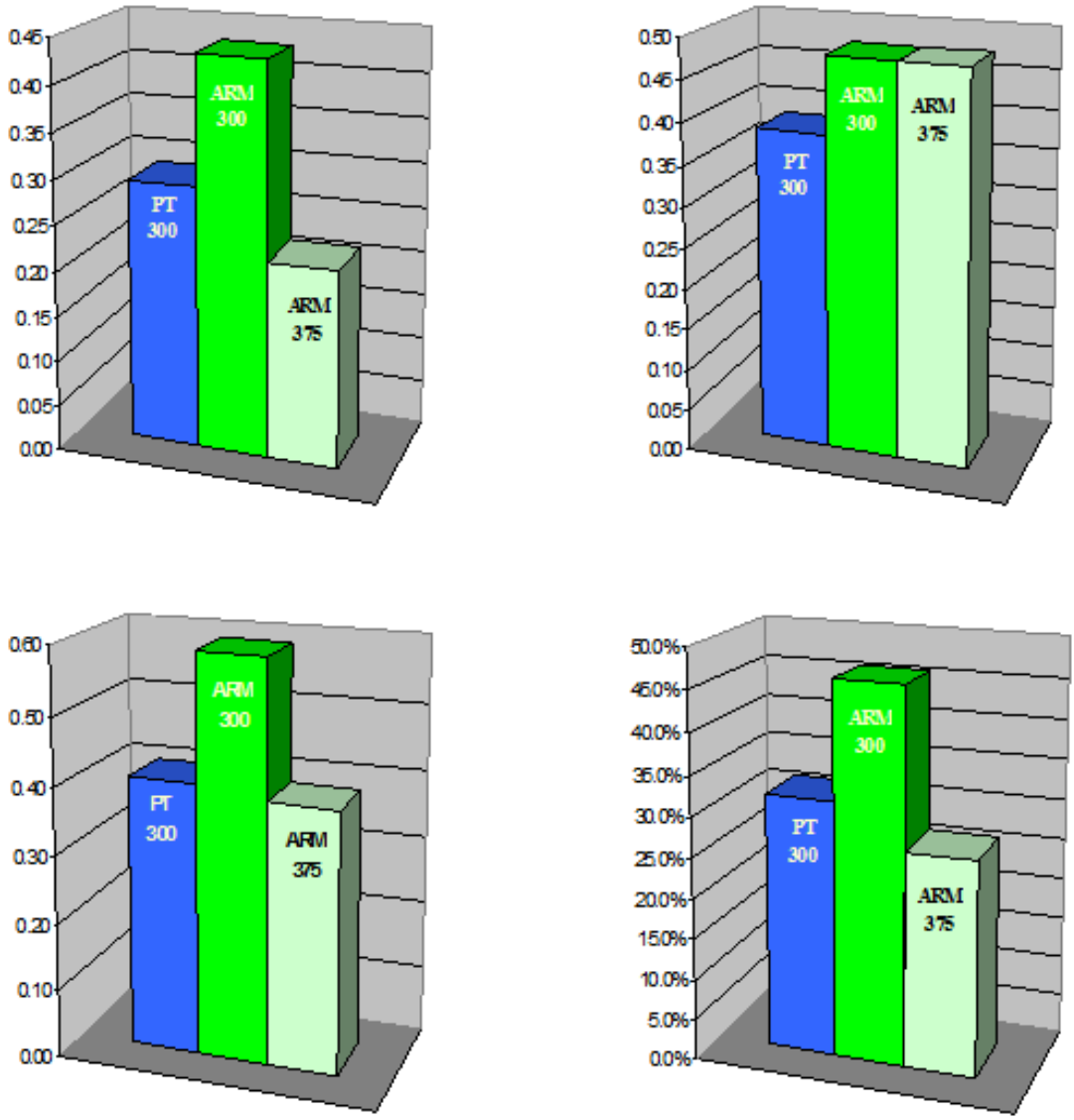

Figura 5.13. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 12.0 m y q = 5 KN/m^2

L = 12.0 m; q = 5 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 300mm	ARM. 300mm	ARM. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	57.10	55.68	57.83	**50**	**60**
Social	Seguridad	Atributos	52	74	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	12	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	750	750	937	**700**	**1000**
		Acero activo (kg/m^2)	5.51	0	0	**0**	**6**
		Acero pasivo (kg/m^2)	8.06	42.57	36.23	**8**	**50**
	Consumo energía	Agua	10	8	10	**0**	**10**
		Electricidad	10	8	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	2.25	1.5	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.25. Rangos de los indicadores para L = 12.0 m y q = 5 KN/m^2

L = 12.0 m; q = 5 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 300mm	ARM. 300mm	ARM. 375mm	POST. 300mm	ARM. 300mm	ARM. 375mm
Económico	0.29	0.43	0.22	**31.6%**	**46.1%**	**26.5%**
Social	0.39	0.48	0.48			
Ambiental	0.40	0.59	0.39			

Tabla 5.26. Vector de prioridad global para L = 12.0 m y q = 5 KN/m^2

En las tablas 5.27 y 5.28 y figura 5.14 se presenta para L = 12 m y q = 10 KN/m^2

L = 12.0 m; q = 10 KN/m^2							
CRITERIO	**SUB-CRITERIO**	**INDICADOR**	POST. 300mm	POST. 375mm	ARM. 375mm	**Valor equivalente a 1**	**Valor equivalente a 0**
Económico	Coste	€/m^2	71.79	70.69	71.10	**70**	**72**
Social	Seguridad	Atributos	52	52	74	**150**	**0**
	Molestias	Atributos	14	14	12	**28**	**0**
Ambiental	Consumo materias primas	Hormigón (kg/m^2)	750	937.5	937.5	**700**	**1000**
		Acero activo (kg/m^2)	8.27	6.43	0	**0**	**9**
		Acero pasivo (kg/m^2)	11.56	12.03	55.38	**10**	**60**
	Consumo energía	Agua	10	10	10	**0**	**10**
		Electricidad	10	10	8	**0**	**10**
	Residuos	m^3/m^2	2.25	2.25	2.25	**0**	**3**

Tabla 5.27. Rangos de los indicadores para L = 12.0 m y q = 10 KN/m^2

L = 12.0 m; q = 10 KN/m^2						
CRITERIO	POST. 300mm	POST. 375mm	ARM. 375mm	POST. 300mm	POST. 375mm	ARM. 375mm
Económico	0.10	0.66	0.45	**17.5%**	**58.5%**	**43.6%**
Social	0.39	0.39	0.48			
Ambiental	0.40	0.35	0.35			

Tabla 5.28. Vector de prioridad global para L = 12.0 m y q = 10 KN/m^2

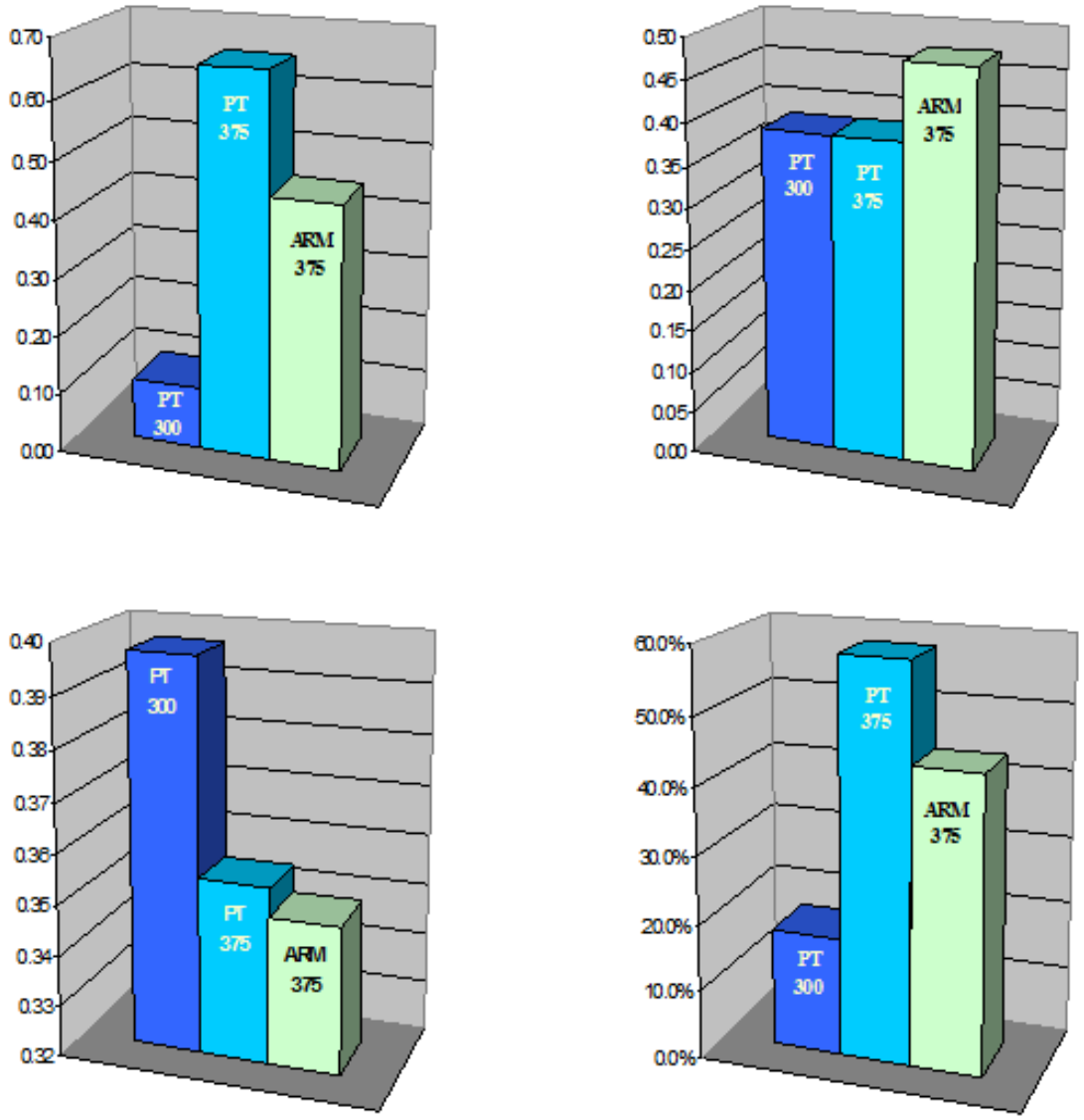

Figura 5.14. Ordenación de valores de las alternativas según criterios (a) económico, (b) social, (c) ambiental y (d) integral para L = 12.0 m y q = 10 KN/m^2

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

Este estudio ha pretendido ser una herramienta útil para encontrar la solución óptima de forjado in situ desde un punto de vista de la sostenibilidad. Para alcanzar este fin se ha recurrido al método de valoración MIVES, que considera la importancia relativa que tienen unos requerimientos sobre otros y permite obtener un resultado fiable y real para poder tomar la decisión adecuada. Con este objetivo se ha llevado a cabo el análisis estructural de más de 100 soluciones alternativas cuyas variables han sido los parámetros estructurales de diseño típicos de un forjado y las tipologías de forjados de hormigón in situ existentes en la actualidad. Con aras de acotar las múltiples alternativas, se ha llevado a cabo un primer filtrado basándose en el requerimiento económico. Esto ha permitido descartas opciones con la finalidad de centrar el análisis de sostenibilidad en las alternativas económicamente más viables.

6.2. CONCLUSIONES GENERALES

Desde una perspectiva de la sostenibilidad y tras el estudio llevado a cabo, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- Los forjados de hormigón postesado son apropiados para luces de 4,0 m y cargas no inferiores a los 20 KN/m^2 y para luces no inferiores a 12,0 m y cargas no inferiores a 10 KN/m^2.

- Los forjados de hormigón armado convencional son idóneos para luces de 4,0 m y cargas no superiores a los 15 KN/m^2 y para luces de 6,5 m y cargas hasta 5

KN/m^2. Resultan apropiados también para luces de 12 m y cargas máximas de 5 KN/m^2.

- Los forjados reticulares son apropiados para luces de 6,5 m y cargas iguales o superiores a 10 KN/m^2 y para luces de 8,0 m y cargas comprendidas entre los 5 y 20 KN/m^2.

6.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Se citaran las conclusiones parciales que se han ido obteniendo durante el avance de este documento.

6.3.1. Conclusiones respecto al análisis estructural

El primer resultado que se ha obtenido son las cuantías de acero para cada una de las alternativas considerando valores de la luz, del espesor y la carga variables. Del análisis estructural no se ha podido extraer aún nada concluyente. No obstante, ha permitido poder descartar algunas alternativas por presentar cuantías totalmente desproporcionadas.

- Para luces de 4.0 m no se ha descartado ninguna alternativa.

- Para luces de 6.4 m se han descartado las alternativas de HA de h = 150 mm y cualquier carga y h = 200 mm desde los 15 KN/m^2.

- Para luces de 8.0 m se han descartado las alternativas de HA de h = 150 mm y cualquier carga, h = 200 mm y carga desde los 10 KN/m^2 y h = 300 mm y carga desde los 15 KN/m^2.

- Para luces de 12.0 m se ha descartado cualquier alternativa de h = 200 mm, las alternativas de HA de h = 300 mm y cualquier carga y h = 375 mm y cargas desde los 10 KN/m^2. Tampoco formarán parte del análisis integral las alternativas reticulares de h = 375 mm.

6.3.2. Conclusiones respecto al requerimiento económico

El segundo resultado relevante que se ha obtenido son los costes para cada una de las alternativas considerando valores de la luz y la carga variables. Del análisis económico se desprenden las siguientes conclusiones específicas:

- Para luces de 4.0 m y todo el rango de cargas estudiado, las alternativas de HA y HP de h = 150 mm son las más económicas, junto con las reticulares de h = 300 mm.

- Para luces de 6.4 m y cargas hasta los 5 KN/m^2, las alternativas de HA y HP de h = 150 mm y las reticulares de h = 300 mm siguen siendo las más económicas. Si se aumenta la carga y hasta los 20 KN/m^2, las alternativas de HP de h = 200 mm y las reticulares de h $\geq$ 300 mm son las más económicas

- Para luces de 8.0 m y para todo el rango de cargas, las alternativas reticulares de h ≥ 300 mm son las más económicas. Las alternativas de HA son competitivas desde el punto de vista económico desde h = 200 mm para cargas de 5 KN/m^2 hasta h = 375 mm para cargas de 15 KN/m^2, pasando por la alternativa de h = 300 mm para cargas de 10 KN/m^2.

- Para luces de 12.0 m y hasta los 5 KN/m^2, las alternativas HA de h ≥ 300 mm y la HP de h = 300 mm son las más económicas. Si se aumenta la carga a 10 KN/m^2 las alternativas HP de h ≥ 300 mm junto con la HA de h = 375 mm son las más recomendables.

6.3.3. Conclusiones respecto al análisis de sostenibilidad

- Para luces de 4.0 m y cargas de hasta 15 KN/m^2, la solución de HA es la más sostenible, mientras que para valores de q ≥ 15 KN/m^2 lo es la solución de HP.

- Para luces de 6.4 m y cargas de hasta 5 KN/m^2, la solución de HA es la más sostenible, mientras que para valores de q ≥ 10 KN/m^2 lo es la solución reticular de h = 300 mm.

- Para luces de 8.0 m y cargas de hasta 10 KN/m^2, la solución reticular de h = 300 mm es la más sostenible, mientras que para valores de q ≥ 10 KN/m^2 lo es la solución reticular de h = 375 mm.

- Para luces de 12.0 m y cargas de hasta 5 KN/m^2, la solución de HA es la más sostenible, mientras que para valores de q ≥ 10 KN/m^2 lo es la solución de HP de h = 375 mm.

6.4 RECOMENDACIONES

Se es consciente de las limitaciones que este estudio tiene a largo plazo. No se han considerado en los análisis fenómenos con ocurrencia a largo plazo como los mantenimientos de los forjados, posibles reparaciones, etc. Si se hubieran considerado, la solución de HP hubiera alcanzado unas mejores puntuaciones desde todos los requerimientos por ser la tipología constructiva con mayores ventajas a largo plazo.

Esta reflexión da pie a la futura línea de investigación de realizar un estudio de los requerimientos que serían aplicables a largo plazo para obtener unos rangos de soluciones óptimas considerando el factor tiempo.

Se puede plantear también la realización de un análisis de sensibilidad de las soluciones obtenidas en el análisis de sostenibilidad. Sería interesante ver como varían las soluciones óptimas cambiando los pesos en las matrices de ponderación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **Calavera Ruiz, J.** *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón armado para edificios*. 1984.

[2] **Calavera Ruiz, J.** *Cálculo, construcción y patología de forjados de edificación.* 1988.

[3] **Rodríguez Martín, L.F.** *Forjados*. 2005.

[4] *Instrucción de Hormigón Estructural. EHE 08*/ Comisión permanente del Hormigón. Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.

[5] **ACIES**. *Sesión técnica monográfica Nº3: Losas postensadas en edificación*. Disponible en: http://es.scribd.com/doc/73333116/13/CRITERIOS-DE-DISPOSICION-DE-ARMADURA-PASIVA

[6] **Regalado Tesoro, F.** *Los forjados reticulares: diseño, análisis, construcción y patología.* 2003.

[7] **Alsina Soluciones en encofrados**. *Alucubetas*. Disponible en: http://www.alsina.com/pdf_upload/catalogo_sistema_home_es_2.pdf

[8] *Guía de aplicación de la Instrucción de Hormigón Estructural: Edificación*/ Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: Ministerio de Fomento, 2003.

[9] **Adapt**. Manual: *Post-Tensioned Concrete Slab and Beam Design Software ADAPT-PT 2012*. Disponible en: http://adaptsoft.com/specs-pt.php

[10] Prontuario Informático de la *Instrucción de Hormigón Estructural 3.0.* Disponible en: http://www.ieca.es/detPublicaciones.asp?id_rep=72

[11] **Murcia, J., Aguado, A. y Marí, A.R**., *Hormigón Armado y Pretensado I*, Edicions UPC, Barcelona, 1993.

[12] *Requisitos de código para hormigón estructural*. Código ACI 318-99. Instituto Americano del Hormigón.

[13] **ITeC**. *Preus de referencia d'Edificació*, 2012. Ed. ITeC, Barcelona.

[14] **UGT**. *Informe accidentes de traba*jo. 2009. Disponible en: www.ugt.es/saludlaboral/infor_acci_trab.pdf

[15] **Rocamora Ruiz, A.L.**, *Memoria del estudio de seguridad y salud para la construcción de edificio polifuncional administrativo*. Castalla (Alicante). 2009. Disponible en: http://www.castalla.org/upload/perfil/CO10-09ESTUDIOSYS.pdf