



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESIS D'ESPECIALITAT

Títol

**MÉTODO DE DISCRIMINACIÓN ENTRE DISTINTAS
SOLUCIONES DE PILARES MEDIANTE CRITERIOS
DE SOSTENIBILIDAD**

Autor/a

PERE DURAN BERTRAN

Tutor/a

ANTONIO AGUADO DE CEA

Departament

ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Intensificació

TECNOLOGIA D'ESTRUCTURES

Data

17-02-2011

Título: Método de discriminación entre distintas soluciones de pilares mediante criterios de sostenibilidad

Autor: Pere Duran Bertran

Tutor: Antonio Aguado De Cea

Palabras Clave: *construcción sostenible - índice de valor – pilares – medioambiente – sociedad – economía árbol de valores – seminario - función de valor*

RESUMEN

El sector de la construcción es uno de los mayores consumidores de recursos naturales y generador de impactos ambientales. Un sistema económico basado en la máxima producción, el consumo, la explotación ilimitada de recursos y el beneficio como único criterio a tener en cuenta es insostenible. Se debe implantar un sistema que mejore las condiciones de vida, compatible con una explotación racional y que cuide el medioambiente. A estas peticiones surge la construcción sostenible, un proceso que requiere la implicación de todos los agentes relacionados en el sector para que se cumplan unos objetivos sostenibles y, al final, obtener productos urbanos eficientes y respetuosos con el medioambiente y la sociedad.

Existen varias herramientas que realizan un análisis sostenible de un proyecto para encontrar así el óptimo, desde el punto de vista sostenible, a diseñar o construir, pero las distintas herramientas toman como sistema de estudio el edificio o proyecto en su totalidad.

El objetivo de la presente tesina se centra en la obtención de una metodología y una herramienta de toma de decisión que sirva para definir un índice de valor y de esta forma evaluar la sostenibilidad de los pilares de una edificación convencional.

Para alcanzar dicho objetivo, se parte de un modelo jerárquico formado por tres requerimientos o pilares fundamentales: medioambiente, sociedad y economía. Mediante estos tres ejes se construye el árbol de valores del modelo. A partir de este árbol se inicia la valoración.

Para llevar a cabo dicha valoración se realizan distintas etapas: ponderación de cada nivel de jerarquía mediante la celebración de un seminario y la participación de distintas personalidades relacionadas con distintos ámbitos del sector de la construcción, construcción de la función de valor, cálculo del valor de las alternativas y el cálculo de la alternativa óptima. Mediante los distintos procesos se consigue un soporte riguroso para la evaluación sostenible que se realizará.

Por su parte, los puntos a destacar de la metodología son: la evaluación sostenible de distintas alternativas de pilares, el desarrollo de un árbol de valores íntegramente para la evaluación sostenible de pilares, la asignación de una función de valor a cada indicador para representar de manera fácil y rápida las preferencias del decisor, y la ponderación de los distintos niveles jerárquicos utilizando un sistema de asignación directa mediante la celebración de un seminario.

Para realizarla comprobación de la metodología, se describen distintas alternativas de pilares diferenciadas por tres parámetros: resistencia característica del hormigón empleado, tipo de sección del pilar y compactación del hormigón en la ejecución de las alternativas. Estas alternativas son evaluadas según la metodología desarrollada concluyendo las alternativas de pilares existentes más sostenibles en el sector de la edificación.

Title: Method to compare different columns using sustainability criteria.

Author: Pere Duran Bertran

Tutor: Antonio Aguado De Cea

Keys: *sustainable construction – index value - columns - environment – society – economy – value tree – seminar – value function*

ABSTRACT

The construction sector is one of the largest consumers of natural resources and a generator of environmental impacts. An economic system based on maximum production, consumption, unlimited exploitation of resources and on profit as the only criterion to consider is untenable. It is essential to implement a system that improves living conditions, that is compatible with a rational exploitation that also looks after the environment. These factors give rise to sustainable construction, a process that requires the involvement of all related stakeholders in the sector in order that they meet sustainability objectives; and, ultimately, to obtain urban products which are efficient and respectful to the environment and to society.

There are several tools that can perform a sustainable analysis of a project to find, from the standpoint of sustainable design and construction, the optimum method, but the various tools take, as the system of study, a building or project in its entirety.

The objective of this thesis is centred upon obtaining a methodology and decision-making tool that serves to define an index value and thus assess the sustainability of the columns of a conventional construction.

To achieve this stated goal, we must divide the analysis into a hierarchical model consisting of three fundamental requirements, or pillars: environment, society and economy. Using these three axes a value tree of the model can be constructed. From this tree the evaluation is begun.

The carrying out of such an assessment is conducted through several stages: weighting each hierarchy level by holding a seminar with the participation of several figures related to specific areas of construction, construction of the value function, calculating the value of alternatives and the calculation of the optimal alternative. Through different processes a rigorous support for the sustainable evaluation may be reached.

For their part, the key elements of the methodology are: the sustainability evaluation of alternative pillars, the development of a full-value tree for sustainable assessment pillars, the assignation of a value function for each indicator to represent easy and quick decision-making preferences, and the weighting of the different hierarchical levels using a direct allocation system by holding a seminar.

For verification of the methodology, several distinct alternative pillars are described by three parameters: characteristic strength of concrete used, the column section type and compaction of concrete in the implementation of the alternatives. These alternatives are evaluated according to the methodology already developed, revealing the most sustainable alternatives to existing pillars in the construction sector.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor de tesina, D. Antonio Aguado De Cea, quien me brindó la oportunidad de iniciar este proyecto, y que gracias a su paciencia, comprensión y sabiduría me ayudó en esos momentos donde más lo requería para tirar adelante la tesina.

Con los mismos respetos que se merece, quiero agradecer al Responsable de Especificaciones del grupo BASFF Construction Chemicals España, D. Guillermo Sánchez Álvarez, su total predisposición y apoyo que me ha prestado a lo largo de los meses que ha durado el desarrollo de esta tesina.

Un especial agradecimiento al grupo que participó en el seminario celebrado el 6 de Octubre de 2010 en el Campus Nord de la UPC compuesto por: el Director Técnico de FCC Construcción, D. Javier Pablo Ainchil Lavin, el Construction Design Manager de Ferrovial, D. Carlos Fernández Lillo, el Gerente de BIS Arquitectes, D. David Garcia Carrera, el Director de Calidad de PROMSA, D. Domènec Masó, y el ingeniero de VSL, D. Carles Cots. Mi más sincero reconocimiento a estas personas por su valiosa opinión sobre el trabajo realizado, y su colaboración en el desarrollo de las ponderaciones del árbol de valores creado en esta tesina.

Quisiera también agradecer a mis padres Pere y Emilia, a mis hermanas Mónica y Sílvia, al resto de mi familia, amigos y compañeros, en especial a Pol, Josep y David por su apoyo y comprensión que me han otorgado en el transcurso de la tesina y a lo largo de todos estos años de universidad.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a mi formación y desarrollo profesional y personal.

CONTENIDO DE LA TESINA

Resumen.....	i
Agradecimientos	iii
Contenido.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xi
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 Hipótesis	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Marco de abordaje	3
1.4 estructura del documento de la tesina	3
CAPÍTULO 2.....	5
2.1 INTRODUCCIÓN	5
2.2 DESARROLLO SOSTENIBLE.....	6
2.3 CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE	9
2.3.1 Definición.....	9
2.3.2 Actores.....	10
2.3.2.1 Administración Pública.....	11
2.3.2.2 Promotores Inmobiliarios y Constructores	11
2.3.2.3 Profesionales del Sector.....	11
2.3.2.4 Organizaciones No Gubernamentales.....	11
2.3.2.5 Organismos responsables de la formación	11
2.3.2.6 Fabricantes de Materiales.....	12
2.3.2.7 Proveedores Energéticos	12
2.3.2.8 Usuario final	12
2.4 ANÁLISIS DE DECISIONES MULTICRITERIO.....	12
2.4.1 Introducción e historia de la decisión multicriterio.....	13
2.4.2 Clasificación de los problemas de decisión multicrterio	15
2.4.2.1 Clasificación según el estado del entorno.....	16
2.4.2.2 Clasificación según el número de criterios de decisión	16
2.4.2.3 Clasificación según la naturaleza de las alternativas	16
2.4.2.4 Clasificación según las características del decisor	16
2.4.3 Clasificación de la metodología multicriterio	17
2.4.4 Métodos de ponderación	18
2.4.4.1 Método de asignación directa	19
2.4.4.2 Método de ordenación	19
2.4.4.3 Métodos de comparación a partir de una sola referencia.....	19
2.4.4.4 Método de comparaciones sucesivas	20

2.4.4.5	Método de comparación de alternativas	20
2.4.4.6	Cálculo de la diversidad de las valoraciones	20
2.4.4.7	Matriz de dominación	21
2.4.5	Principio de composición jerárquica	22
2.4.5.1	Árbol de valores	22
2.4.5.2	Árbol de decisiones	22
2.4.6	Técnicas de decisión multicriterio	23
2.4.6.1	Teoría de la utilidad multiatributo	23
2.5	HERRAMIENTAS MULTICRITERIO EXISTENTES PARA LA EVALUACIÓN SOSTENIBLE	
	27	
2.5.1	Métodos de evaluación	28
2.5.1.1	BREEAM.....	28
2.5.1.2	BEES.....	29
2.5.1.3	GBC (Green Building Challenge).....	29
2.5.1.4	GREEN GUIDE TO SPECIFICATION	30
2.5.1.5	LEED (Leadership in Energy Environmental Deisgn) Green Building Rating System .	31
2.5.1.6	ECOPROP	32
2.5.1.7	MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible)	32
2.6	Síntesis del estado del conocimiento y aportaciones.....	33
3.1	Introducción.....	35
3.2	Bases DEL MÉTODO	36
3.2.1	Universo del modelo.....	36
3.2.2	Criterios de evaluación	36
3.2.2.1	Requerimientos.....	37
3.2.3	Diferencias con otras herramientas	37
3.3	Modelo	38
3.3.1	Introducción	38
3.3.2	Desarrollo del árbol de valores.....	39
3.3.2.1	Requerimientos.....	39
3.3.2.2	Criterios.....	40
3.3.2.3	Indicadores.....	41
3.3.3	Árbol de valores.....	42
3.4	Metodología.....	43
3.4.1	Ponderación de requerimientos, criterios e indicadores	43
3.4.1.1	Seminario	44
3.4.2	Función de valor	47
4.1	INTRODUCCIÓN	49
4.2	INDICADORES SELECCIONADOS.....	50
4.2.1	Requerimiento medioambiental	52
4.2.1.2	Emisiones de CO ₂	53
4.2.1.3	Consumo de Hormigón	55
4.2.1.4	Consumo de Acero	57
4.2.2	Requerimiento social	59
4.2.2.2	Molestias para el productor.....	60
4.2.2.3	Seguridad del operario.....	64
4.2.2.4	Molestias al entorno	72
4.2.3	Requerimiento económico	76
4.2.3.2	Coste de ejecución	77
4.2.3.3	Costes de no conformidad	79
4.2.3.4	Durabilidad.....	83
4.2.3.5	Habitabilidad.....	86

5.1	Introducción	89
5.2	ALTERNATIVAS de pilares	90
5.3	cuantificación de los indicadores	92
5.3.1	Indicadores Medioambientales	92
5.3.1.2	Emisiones de CO ₂	93
5.3.1.3	Consumo de hormigón.....	95
5.3.1.4	Consumo de acero	95
5.3.1.5	Síntesis del requerimiento medioambiental	97
5.3.2	Indicadores Sociales	98
5.3.2.1	Molestias al productor	98
5.3.2.2	Seguridad	99
5.3.2.3	Molestias al entorno	100
5.3.2.4	Síntesis del requerimiento social	101
5.3.3	Indicadores Económicos	103
5.3.3.1	Coste de ejecución	103
5.3.3.2	Costes de no conformidad	105
5.3.3.3	Durabilidad.....	107
5.3.3.4	Habitabilidad.....	108
5.3.3.5	Síntesis del requerimiento económico	109
5.4	índice de sostenibilidad	111
6.1	Introducción	115
6.2	CONCLUSIONES GENERALES	115
6.2.1	Conclusiones medioambientales.....	116
6.2.2	Conclusiones sociales	116
6.2.3	Conclusiones económicas.....	117
6.2.4	Conclusiones sostenibles.....	117
6.3	Conclusiones específicas	118
6.3.1	Conclusiones acerca del estado del conocimiento	118
6.3.2	Conclusiones acerca del análisis del método	119
6.3.3	Conclusiones acerca de los indicadores y funciones de valor	120
6.3.4	Conclusiones acerca de la evaluación de alternativas y resultados	120
6.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	120
ANEJO 1	127
ANEJO 2	143
ANEJO 3	145
CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN		
6.1	INTRODUCCIÓN.....	115
6.2	CONCLUSIONES GENERALES.....	115
6.2.1	Conclusiones medioambientales.....	116
6.2.2	Conclusiones sociales.....	116
6.2.3	Conclusiones económicas.....	117
6.2.4	Conclusiones sostenibles.....	117
6.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	118
6.3.1	Conclusiones acerca del estado del conocimiento	118
6.3.2	Conclusiones acerca del análisis del método	119
6.3.3	Conclusiones acerca de los indicadores y funciones de valor	120
6.3.4	Conclusiones acerca de la evaluación de alternativas y resultados	120
6.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	120

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.....	123
ANEJO 1 - DIMENSIONAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS	127
ANEJO 2 - CÁLCULO EMISIONES DE CO₂.....	143
ANEJO 3 - CÁLCULOS ECONÓMICOS	145

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 2.1 Árbol de decisión tipo.
- Fig. 2.2 Representación de diversos tipos de función de valor combinando diferentes tendencias y formas.
- Fig. 3.1 Esquema del árbol de valores
- Fig. 3.2 Requerimientos que definen la sostenibilidad.
- Fig. 3.3 Árbol de valores
- Fig. 4.1 Función de valor del indicador emisiones de CO₂.
- Fig. 4.2 Función de valor del indicador consumo de hormigón.
- Fig. 4.3 Función de valor del indicador consumo de acero.
- Fig. 4.4 Función de valor del indicador molestias para el productor
- Fig. 4.5 De izquierda a derecha, de arriba abajo: ejemplo de torre - andamio alrededor del pilar, ejemplo de hormigonado mediante plataforma elevadora, ejemplo de plataformas universales sobre encofrado y ejemplo de torre-andamio móvil utilizado para el hormigonado de pilares.
- Fig. 4.6 Función de valor del indicador seguridad del operario
- Fig. 4.7 Función de valor del indicador molestias al entorno.
- Fig. 4.8 Función de valor del indicador coste del pilar
- Fig. 4.9 Función de valor del indicador costes de no conformidad
- Fig. 4.10 Función de valor para la cuantificación del indicador de durabilidad.
- Fig. 5.1 Formulación para el cálculo de la seguridad del operario.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Metodología en la decisión multicriterio
Tabla 2.2	Métodos de ponderación de variables o asignación de pesos.
Tabla 3.1	Pesos de los distintos niveles del árbol de valores.
Tabla 4.1	Requerimientos, criterios e indicadores del modelo.
Tabla 4.2	Descripción del requerimiento medioambiental.
Tabla 4.3	Criterios e indicadores el requerimiento social.
Tabla 4.4	Niveles sonoros y tiempos de exposición límite para un operario.
Tabla 4.5	Niveles sonoros de las distintas formas de compactación de pilares.
Tabla 4.6	Formulación para evaluar la seguridad del operario en la ejecución de pilares
Tabla 4.7	Valoración de la seguridad del acceso al puesto de trabajo (S_A)
Tabla 4.8	Puntuaciones para la cuantificación del indicador según el modo de trabajo utilizado.
Tabla 4.9	Tabla 70.2 de la EHE-08
Tabla 4.10	Puntuaciones del coeficiente del tiempo de compactación
Tabla 4.11	Puntuaciones del coeficiente de sección
Tabla 4.12	Puntuaciones del coeficiente del tipo de hormigón
Tabla 4.13	Puntuaciones de las molestias al entorno
Tabla 4.14	Criterios e indicadores del requerimiento económico.
Tabla 4.15	Desglose del coste de ejecución de un pilar.
Tabla 4.16	Consistencias del hormigón según el artículo 31.5 de la EHE-08
Tabla 4.17	Criterios para evaluar el riesgo de obtener un pilar no conforme con la calidad exigida
Tabla 4.18	Precio medio de la vivienda según la Sociedad de Tasación (2009) para cada comunidad autónoma.
Tabla 4.19	Función de valor del indicador habitabilidad
Tabla 5.1	Alternativas de pilares consideradas en el presente capítulo
Tabla 5.2	Dosificación del hormigón empleado para las alternativas estudiadas.
Tabla 5.3	Dimensiones de cada alternativa según la resistencia característica del hormigón empleado
Tabla 5.4	Emisiones de CO_2 de las dosificaciones empleadas en los distintos hormigones

Tabla 5.5	Emisiones de CO2 de cada una de las alternativas y valor del indicador de emisiones de CO2
Tabla 5.6	Consumo de hormigón y valor del indicador consumo de hormigón para cada alternativa
Tabla 5.7	Disposición de las armaduras
Tabla 5.8	Consumo de acero y valor del indicador consumo de acero para cada alternativa
Tabla 5.9	Evaluación medioambiental de las distintas alternativas de pilares
Tabla 5.10	Valor del indicador molestias al productor según el método de compactación empleado
Tabla 5.11	Evaluación del indicador Seguridad para alternativas rectangulares
Tabla 5.12	Evaluación del indicador de Seguridad para alternativas circulares
Tabla 5.13	Evaluación del indicador de molestias al entorno
Tabla 5.14	Evaluación social de las distintas alternativas de pilares
Tabla 5.15	Evaluación del indicador Coste de ejecución para alternativas rectangulares
Tabla 5.16	Evaluación del indicador Coste de ejecución para alternativas circulares
Tabla 5.17	Evaluación de los costes de no conformidad para alternativas de sección rectangular
Tabla 5.18	Evaluación del indicador Durabilidad para alternativas rectangulares
Tabla 5.19	Valoración del indicador Durabilidad para alternativas circulares
Tabla 5.20	Valoración del indicador de habitabilidad
Tabla 5.21	Evaluación económica de distintas alternativas de pilares
Tabla 5.22	Ponderación de los requerimientos sostenibles
Tabla 5.23	Valoración ambiental de distintas alternativas de pilares
Tabla 5.24	Valoración sostenible para alternativas rectangulares
Tabla 5.25	Valoración sostenible para alternativas circulares
Tabla 6.1	Alternativas más sostenibles
Tabla 6.2	Alternativas menos sostenibles

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 HIPÓTESIS

La vida del hombre está llena de decisiones que deben tomarse cada día y en cada momento. La mayoría de las decisiones no tienen la menor importancia y suelen ser decisiones respecto a realidades intrascendentes de la vida. Es por esto que la mayor parte de las personas toman decisiones más basadas en el sentido común que en la razón.

Según los profesores Thomas J. D’Zurilla y Arthur Nezu: “la vida está llena de problemas a ser resueltos”, de aquí que sea deseable que las personas desarrollen un sistema de competencias y habilidades necesarias para ajustarse a los inevitables dilemas, sobre todo aquellos que implican inevitables cambios y tomas de decisiones trascendentales.

El sector de la construcción está repleto de problemas y decisiones que deben de ser tomadas con un margen de tiempo limitado y cuyas repercusiones pueden ser de un alto grado de responsabilidad. Algunas de estas situaciones aparecen en el momento de elegir qué proyecto será ejecutado de entre distintas propuestas que se presenten. Estas distintas opciones suelen cumplir los requerimientos básicos que se exigen e incluso mejorarlos, pero todos ellos tendrán distintos parámetros que los harán diferentes, aportándoles ciertas ventajas y desventajas de unos a los otros.

Para la ayuda en la toma de decisión de que proyecto o solución es el más adecuado según los criterios del decisor, existen diferentes herramientas que realizan una valoración de distintos aspectos y dan al decisor una referencia para fundamentar y ayudar en su elección. Para llevar a cabo el análisis se valoran las condiciones más desfavorables con el fin de conseguir identificar la alternativa más eficiente. Usualmente, en el análisis son examinados en profundidad todos los aspectos técnicos pero, desafortunadamente, no se tiene en cuenta con la suficiente importancia el estudio de otras perspectivas como pueden ser: el medioambiental, el social, etc.

El sector de la construcción se caracteriza también por ser, en comparación con otros sectores industriales, uno de los ámbitos con mayor consumo de recursos naturales y generador de impactos ambientales. Debido a la repercusión de estos impactos, en la última década, el concepto de desarrollo sostenible ha cobrado mayor importancia en la mayor parte de las actividades económicas a nivel mundial, desarrollando así lo que hoy en día se conoce como Construcción Sostenible en el sector de la construcción.

En el entorno de la Construcción Sostenible, son muchas las herramientas que permiten una valoración de la sostenibilidad de los diferentes proyectos. Observando una gran variedad de estas, se observa que mayoritariamente todas estas permiten el análisis de todo un proyecto o edificación. Es decir, realizan una valoración de la sostenibilidad tomando como sistema el edificio en su totalidad.

Por lo contrario, en esta tesina se considera que en determinadas situaciones un análisis global de todo un edificio puede no conseguir una correcta discriminación o análisis de sostenibilidad para situaciones más concretas o locales, como pueden ser los pilares o determinadas unidades de obra. Por consiguiente, esta tesina pretende abrir otra vía de análisis, el estudio y valoración sostenible de las distintas partes de la estructura de un edificio por separado para así, realizar una buena discriminación entre las distintas soluciones posibles y facilitar la toma de decisión.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Mediante el punto de vista de realizar una valoración sostenible de las diferentes partes de un edificio por separado, esta tesina se centra en estudiar distintas alternativas de pilares para una edificación convencional. El objetivo será desarrollar una metodología para evaluar los distintos pilares y señalar cuál de ellos es el mejor y así discriminar entre las distintas soluciones. Para comparar las alternativas utilizaremos distintos criterios de sostenibilidad. Para esta tesina, la mejor solución será aquella que ejecute el pilar de la forma más sostenible, es decir, la que llegue a un conceso con los tres grandes pilares de la sostenibilidad: medio ambiente, economía y sociedad. La solución que consiga el mejor equilibrio de estos tres requerimientos podremos afirmar que es la solución más sostenible y por lo tanto, a criterio de esta tesina, la mejor.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos complementarios que ayudan al desarrollo del objetivo principal de la presente tesina se encuentran:

- Repasar la historia y la situación actual del sector de la construcción en el entorno sostenible.
- Obtener una visión global de las metodologías y herramientas existentes entorno la toma de decisión. Así, se adquirirá un conocimiento del trabajo realizado hasta

ahora y servirá como base de conocimiento para la metodología que se pretende desarrollar.

- Identificar los requerimientos y los distintos componentes que forman parte de la construcción de pilares.
- Aportar una metodología de cálculo de tal manera que permita evaluar la ejecución de pilares desde los distintos puntos de vista de la sostenibilidad.
- Definir los diferentes indicadores que permitirán la evaluación de cada alternativa de pilar en estudio.
- Desarrollar una función de valor para cada indicador que permita así la cuantificación de estos, y por lo tanto, la obtención de un índice global (valor) para cada alternativa.
- Mostrar la validez y los resultados del modelo realizando la evaluación sostenible mediante la metodología desarrollada a distintas soluciones de pilares. Así, identificaremos que soluciones de pilares son las más sostenibles.

1.3 MARCO DE ABORDAJE

La tesina, basada en la creación de un método para la discriminación de pilares, se desarrolla mediante las metodologías y conocimientos existentes sobre el análisis de toma de decisión multicriterio.

El proceso de toma de decisión multicriterio consiste en una serie de conceptos, métodos y técnicas destinadas a la ayuda de la toma de decisiones que implican diferentes criterios en conflicto y múltiples agentes interesados.

De forma más específica, mediante el principio de composición jerárquica se procederá a desarrollar un árbol de decisiones. Éste, mediante los parámetros representativos para la toma de decisión, estructurará el análisis de cada alternativa y facilitará la elección de la mejor opción existente. La elección se realizará después de que cada alternativa de pilar le sea asignada una puntuación en función de unos ciertos parámetros. De esta manera la comparación entre pilares es objetiva, sencilla y rápida de realizar.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO DE LA TESINA

La tesina está estructurada en 6 capítulos, siguiendo un proceso de desarrollo de los objetivos citados anteriormente.

El **capítulo uno** integra la justificación de la investigación, los objetivos generales y específicos y la estructura de esta memoria.

El **capítulo dos** recoge una introducción a la sostenibilidad y un resumen del estado de conocimiento de los métodos de ayuda a la decisión multicriterio así como algunas de las herramientas actualmente existentes.

El **capítulo tres** plantea la aportación de la tesina, una metodología para cuantificar el valor de distintas alternativas de pilares desde el punto de vista sostenible.

El **capítulo cuatro** se presenta la caracterización y análisis de las variables que han sido elegidas en la metodología desarrollada en el capítulo anterior.

En el **capítulo cinco** se evalúan distintas alternativas de pilares mediante la metodología desarrollada. Después del análisis de sostenibilidad realizado será posible identificar las alternativas más sostenibles para pilares de edificación.

El **capítulo seis** resume las conclusiones principales y ofrece una visión general del desarrollo de la tesina. Adicionalmente se incluyen unas recomendaciones respecto a las futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Según los economistas, el sector de la construcción de un país determina en gran medida el desarrollo económico de las demás industrias debido a la gran cantidad de insumos y servicios que son generados a partir de esta actividad. Según datos oficiales, en 2008 (inicios de la recesión económica) el peso de la construcción en España alcanzó el 17,9% del PIB nacional y ocupaba el 13% del empleo total del país. Sin embargo, si a esta cifra se le elimina la aportación de los impuestos indirectos al crecimiento económico y se contabiliza el sector de los servicios relacionados con el mercado de la vivienda, el peso real del ámbito inmobiliario en España se elevaba hasta el 39.4% del PIB español.

El sector de la construcción se caracteriza también por ser, en comparación con otros sectores industriales, uno de los ámbitos con mayor consumo de recursos naturales (madera, minerales, agua y energía) y generador de impactos ambientales. Según el “World Watch Insitute” la edificación consume el 25% de las extracciones de materias primeras de la litosfera. Además, en España se generaba anualmente 38,5 millones de toneladas de residuos de la construcción [Cemex, 2006]. Se estima pues, que la contribución del hormigón a los residuos de construcción y demolición es del 53% en volumen y del 67% en peso [Wilson, A.; 1993].

Debido a la repercusión de estos impactos, en la última década, el concepto de desarrollo sostenible ha cobrado mayor importancia en la mayor parte de las actividades económicas a nivel mundial. La construcción sostenible como proceso completo y complejo implica que en él mismo existen numerosos agentes identificables cuya actuación puede ser valorada desde el punto de vista de la sostenibilidad. Buena prueba de ello en el sector, han sido las bases que se han sentado y los organismos creados para unificar criterios y estrategias de sostenibilidad.

Con los antecedentes descritos, el presente capítulo tiene como objetivo conocer los criterios que definen la sostenibilidad y enfocar este concepto en el sector de la construcción y así extraer los conceptos necesarios para ser aplicados en la ejecución de pilares. Para ello también será importante conocer las diferentes metodologías y herramientas existentes en torno al desarrollo sostenible.

Por lo tanto, en primer lugar se realizará un breve repaso a algunos conceptos sobre sostenibilidad aplicados al sector de la construcción y se mostrarán los planteamientos existentes actualmente. A partir de aquí se fijará el punto de partida para la propuesta que se realizará en la presente tesina.

Para la comprensión del capítulo, este se estructura en los siguientes apartados:

- Desarrollo sostenible.
- Construcción sostenible.
- Análisis de decisiones multicriterio.
- Herramientas multicriterio existentes para la evaluación sostenible.
- Síntesis del estado del conocimiento y aportaciones.

2.2 DESARROLLO SOSTENIBLE

Está probado que el sistema económico basado en la máxima producción, el consumo, la explotación ilimitada de recursos y el beneficio como único criterio de la buena marcha económica es insostenible y las consecuencias para la sociedad y el planeta son gravísimas. Un planeta limitado no puede suministrar indefinidamente los recursos que esta explotación exigiría. Por ello se ha impuesto la idea de que hay que ir a un desarrollo real, que permita la mejora de las condiciones de vida, pero compatible con una explotación racional del planeta que cuide el ambiente.

A principios de los años setenta empezaron a vislumbrarse las consecuencias ambientales de la llamada “Sociedad Industrial” y se empezaron a plantear reflexiones sobre el medioambiente y los recursos disponibles. El primer informe sobre los límites del crecimiento del Club de Roma de 1971, ya planteaba dudas sobre la viabilidad del

crecimiento económico a nivel mundial. Es en este contexto también cuando apareció el término “ecodesarrollo” que nunca llegó a encajar realmente en los círculos económicos convencionales aunque contribuyó al aumento de la conciencia social. En 1973, y como consecuencia de la crisis del petróleo, se empezó a plantear la necesidad del ahorro energético, al tiempo que comenzaban las críticas hacia la denominada sociedad del “usar y tirar”.

Durante esos años, palabras como ecología o medioambiente se encontraban presentes en todos los ámbitos y fue en los ochenta cuando surgió el uso del llamado “Desarrollo Sostenible”. Este concepto se aplica al desarrollo socio-económico y fue formalizado por primera vez en el Informe Brundtland en 1987. Este documento surgió a partir de los trabajos realizados por la Comisión Mundial de Medioambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, creada en 1983. Se definió “desarrollo sostenible” como:

“el desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades”

Según esta definición el desarrollo sostenible tiene que conseguir al mismo tiempo:

- Satisfacer las necesidades del presente, fomentando una actividad económica que suministre los bienes necesarios a toda la población mundial.
- Satisfacer las necesidades del futuro, reduciendo al mínimo los efectos negativos de la actividad económica, tanto en el consumo de recursos como en la generación de residuos, de tal forma que sean soportables por las próximas generaciones.

En 1992, en la cumbre de Río de Janeiro, se presentó este evento como la cumbre del “desarrollo y medioambiente” de forma integradora, aprobándose el Programa 21 de las Naciones Unidas para promover el desarrollo sostenible. El Programa 21, o también conocido como Agenda 21, es un plan detallado de acciones que deben ser acometidas a nivel mundial, nacional y local por entidades de la ONU, los gobiernos de sus estados miembros y por grupos principales particulares en todas las áreas en las que ocurren impactos humanos sobre el medioambiente. En esta conferencia quedó esbozado el concepto de la siguiente forma:

“con el objetivo de establecer una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos y se proteja la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial, reconociendo la naturaleza integral e interdependiente de la Tierra, nuestro hogar”

Dichas acciones eran de carácter general por lo que los diferentes sectores necesitaron pautas para proceder desde un enfoque sostenible. Hoy en día muchos de los miembros signatarios del Programa 21 han ratificado los acuerdos y han organizado sus propios programas a nivel nacional y local, siguiendo guías que han desarrollado distintas entidades asociadas a las Naciones Unidas.

El Programa 21 ha tenido un estrecho seguimiento a partir del cual se han desarrollado ajustes y revisiones. Primero con la conferencia denominada "Río más 5" en 1997 en la sede de la ONU en Nueva York; posteriormente con la adopción de una agenda complementaria denominada "Objetivos de desarrollo del milenio", con énfasis particular en las políticas de globalización y en la erradicación de la pobreza y el hambre, adoptadas por 199 países en la 55ª Asamblea de la ONU, celebrada en Nueva York en el 2000. La más reciente fue la Cumbre de Johannesburgo, reunida en Sudáfrica en 2002.

En el Documento Final de la cumbre mundial de las Naciones Unidas en el 2005, se refieren al desarrollo sostenible mediante tres componentes que son: el desarrollo económico, el desarrollo social y la penetración del medioambiente, como "pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente". Estos tres pilares son:

- **Pilar Económico:** funcionamiento financiero clásico, pero también capacidad para contribuir al desarrollo económico en el ámbito de creación de empresas de todos los niveles.
- **Pilar Social:** consecuencias sociales de la actividad de la empresa en todos los niveles, es decir, los trabajadores (condiciones de trabajo, nivel salarial, etc), los proveedores, los clientes, las comunidades locales y la sociedad en general, necesidades humanas básicas.
- **Pilar Ambiental:** compatibilidad entre la actividad social de la empresa y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas. Incluye un análisis de los impactos del desarrollo social de las empresas y de sus productos en términos de flujos, consumo de recursos difícil o lentamente renovables, así como en términos de generación de residuos y emisiones... Este último pilar es necesario para que los otros dos sean estables.

Cuando se habla de sostenibilidad muchas de las veces se realiza un mal uso de la palabra y se confunde con lo que hoy en día se denomina "desarrollo verde". Generalmente éste último se diferencia del sostenible en que se prioriza lo que algunos consideran "sostenibilidad ambiental" sobre la "sostenibilidad económica y social". Sin embargo, éste punto de vista puede pretender objetivos a largo plazo inalcanzables. Por ejemplo, una planta de tratamiento de última tecnología con gastos de mantenimiento sumamente altos no puede ser sostenible en las regiones del mundo con menos recursos financieros. Una planta de última tecnología "respetuosa con el medioambiente" con altos gastos de operación puede ser menos sostenible que una planta rudimentaria, incluso si es más eficaz desde un punto de vista ambiental.

En definitiva, el objetivo del desarrollo sostenible es definir proyectos viables y reconciliar los aspectos económicos, sociales y ambientales de las actividades humanas. Estos tres pilares deben tenerse en cuenta por parte de todos los agentes implicados, tanto empresas como personas.

2.3 CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

2.3.1 Definición

La industria de la construcción es uno de los sectores que genera mayor impacto ambiental. Los datos prueban que los edificios consumen entre el 20% y el 50% de los recursos naturales y contribuyen en gran modo al aumento de las emisiones y la contaminación, tanto durante el proceso constructivo como a lo largo de su vida útil, una vez terminados.

Por otra parte resulta elevado el impacto de su emplazamiento sobre el territorio: en torno al 80% de las personas residen en zonas urbanas, con influencia negativa en otros sectores como el del transporte y la energía. Otro tema importante es la generación de residuos constructivos, de mantenimiento y de derribo de los edificios, con perspectiva de aumento y dificultades para su reutilización o reciclaje.

La construcción sostenible abarca no sólo la adecuada elección de materiales y procesos constructivos, si no que se refiere también al entorno urbano y al desarrollo del mismo. Se basa en la adecuada gestión y reutilización de los recursos naturales, la conservación de la energía. Habla de planificación y comportamiento social, hábitos de conducta y cambios en la usabilidad de los edificios con el objeto de incrementar su vida útil. Analiza todo el ciclo de vida: desde el diseño arquitectónico del edificio y la obtención de las materias primas, hasta que éstas regresan al medio en forma de residuos.

En la primera Conferencia Internacional de Construcción Sostenible celebrada en Tampa (Florida) en noviembre de 1994, se introdujo el concepto de desarrollo sostenible asociado a la industria de la construcción. En este caso, al igual que en el desarrollo naciente de otros campos, los esfuerzos se centraron en llevar a cabo una certera y adecuada definición del concepto de sostenibilidad en construcción.

El término construcción sostenible, fue originalmente propuesto para describir la responsabilidad de la industria de la construcción en lograr el cumplimiento del término Sostenibilidad. Posteriormente, Kibert en 1994 propone la construcción sostenible como:

“el crear usando un ambiente sano, empleando los recursos eficientemente en base a principios ecológicos”

En el congreso de educación ambiental WWF en 1993 se afirma que la Construcción Sostenible abarca, no sólo a los edificios propiamente dichos, sino también debe tener en cuenta su entorno y la manera como se comportan para formar las ciudades. El desarrollo urbano sostenible deberá tener la intención de crear un entorno urbano que no atente contra el medioambiente, con recursos, no solo en cuanto a las formas y la eficiencia energética, sino también en su función, como un lugar para vivir.

Según Casado, 1996, define Construcción Sostenible como:

“aquella que, con especial respeto y compromiso con el Medioambiente, implica el uso sostenible de la energía. Cabe destacar la importancia del estudio de la aplicación de las energías renovables en la construcción de los edificios, así como una especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y la minimización del consumo de energía que implica la utilización de los edificios”

Lanting en 1996 afirmó:

“La construcción sostenible se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales causados por los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios y por el ambiente urbanizado”

2.3.2 Actores

En el apartado anterior se ha visto que la definición de construcción sostenible es planteada como un proceso complejo donde se relacionan numerosos agentes cuya actuación puede ser valorada desde el punto de vista de la sostenibilidad.

La construcción sostenible necesita la implicación de todos los agentes que aparecen en el proceso de construcción para que se cumplan los objetivos y al final, obtener productos urbanos eficientes y respetuosos con el Medioambiente. Para ello es necesario un trabajo coordinado para la obtención de unos resultados satisfactorios, imposibles de conseguir de manera independiente.

Dentro del sector de la construcción se evidencian una serie de tendencias a seguir por parte de todos los agentes implicados en el proceso:

- Existe la voluntad creciente en todos los ámbitos del sector de incorporar criterios medioambientales y sostenibles.
- Progresivamente se va tomando conciencia de los límites medioambientales y de los efectos negativos de proyectos urbanos o edificios insostenibles.
- Se está haciendo un esfuerzo normativo importante para perseguir el objetivo de mejora ambiental.
- Se trabaja en el desarrollo de soluciones técnicas viables y eficientes aplicables en el proceso.

- Se establecen sistemas de medición y control que permitan ir validando las acciones de cada uno de los agentes implicados por separado así como valorar las acciones conjuntas entre los mismos.

Todas estas medidas son tenidas en cuenta por los distintos agentes participantes en el sector. A continuación se realiza una breve presentación de cada uno de los organismos o representantes implicados y su rol dentro de la construcción sostenible.

2.3.2.1 Administración Pública

La administración es la encargada de establecer las bases del proceso aportando los criterios básicos a aplicar mediante legislación reguladora a todos los niveles. También tiene que asumir su responsabilidad como modelo formativo, potenciando las experiencias prácticas y los ejemplos para que puedan ser compartidos por la sociedad en general.

2.3.2.2 Promotores Inmobiliarios y Constructores

Estos agentes representan un papel clave en el proceso de construcción sostenible ya que son los responsables del diseño de la obra y la edificación. Ellos son los que marcan las pautas, eligen los profesionales responsables del diseño y a los prescriptores de la obra. Su implicación es la base para realizar cambios en los modelos existentes y en la gestión de la obra considerando además la inminente nueva normativa de aplicación de criterios y tecnologías más eficientes en los nuevos edificios.

2.3.2.3 Profesionales del Sector

Este grupo engloba a todos aquellos que intervienen en el desarrollo proyectual y en la materialización de la obra, es decir, arquitectos, ingenieros, etc. Su predisposición a la construcción sostenible es fundamental para que las ideas, medidas o criterios se cumplan y pasen a ser realidades físicas. Para ello es importante un aumento de su profesionalización en temas de sostenibilidad.

2.3.2.4 Organizaciones No Gubernamentales

Las ONG juegan un papel vital en la concienciación de la sociedad, siendo los transmisores de información y conocimiento sobre todos los ámbitos relacionados con el medioambiente.

2.3.2.5 Organismos responsables de la formación

Su función es potenciar la investigación en los procesos para poder desarrollar criterios y tecnologías viables. También tienen la misión en contribuir a la formación eficaz de los profesionales del sector mediante el desarrollo de actualizados y completos programas que incluyan pautas claras de sostenibilidad a todos los niveles.

2.3.2.6 Fabricantes de Materiales

Éstos agentes deben realizar un análisis de los procesos de fabricación, distribución y transporte para mejorar su eficiencia, potenciando en lo posible el ahorro energético y el uso de las energías renovables como el resto de los agentes implicados. Dentro de sus posibilidades deben asumir un papel divulgativo e informativo sobre las posibilidades de reutilización y reciclaje de los productos que distribuyen.

2.3.2.7 Proveedores Energéticos

Los proveedores energéticos deben tomar la iniciativa en lo que se refiere el consumo eficiente de la energía y cumplimiento de las exigencias del protocolo de Kioto. En el mercado competitivo se están realizando esfuerzos en desarrollo I+D+i sacando al mercado productos y servicios con clara vocación sostenible y aportando información al usuario final y al profesional del sector.

2.3.2.8 Usuario final

El usuario tiene la capacidad de influir en el proceso de dos formas:

- Mediante la elección medioambientalmente responsable del producto más acorde con sus necesidades.
- Su manera de ejercer el uso y mantenimiento del producto seleccionado.

Un aumento de la demanda de edificios y servicios asociados de carácter sostenible contribuiría a un incremento de la oferta y mejora de los productos urbanos existentes.

El gran cambio del modelo de actuación del sector de la construcción se producirá cuando todos los agentes implicados en el proceso tomen conciencia de que nuevos criterios y tecnologías son viables a nivel económico y práctico y que su aplicación puede contribuir significativamente a la reducción de consumos de los recursos ambientales limitados de los que disponemos como el suelo, el agua, los materiales, la energía, etc.

2.4 ANÁLISIS DE DECISIONES MULTICRITERIO

Este apartado deja de lado la sostenibilidad y presenta el análisis de decisiones multicriterio. Éste tipo de análisis y las distintas herramientas existentes servirán de referencia a esta tesina para la elaboración de la nueva metodología que se pretende desarrollar para la comparación de pilares de forma sostenible.

2.4.1 Introducción e historia de la decisión multicriterio

La toma de decisiones resulta un proceso habitual en la rutina de las personas. En numerosas ocasiones los individuos se encuentran frente a diferentes alternativas entre las que deben seleccionar la que, a su juicio, parece mejor o satisface la mayor parte de las necesidades que debe cubrir. Muchas de estas ocasiones se deben adoptar decisiones difíciles con intereses contrapuestos y que involucran a distintas personas y elementos difícilmente valorables. Tomar buenas decisiones es la tarea más difícil y crucial de las personas (Asimow, 1968).

Tal es la presión que puede generar la toma de una decisión que llega a producir tensión psicológica a la mayoría de las personas. Esto viene provocado por dos motivos: la preocupación por las consecuencias materiales y sociales y el riesgo a perder el prestigio y la autoestima como decisor. (Dieter, 1983)

La toma de decisiones normalmente se basa en los conocimientos y la experiencia del decisor. En contadas ocasiones se basa en una metodología sistemática o herramienta de apoyo a la decisión. El Análisis de Decisión Multicriterio (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA), es una valiosa herramienta para asistir al decisor en el proceso de decisión multicriterio. Consiste en una serie de conceptos, métodos y técnicas para ayudar a las personas a tomar decisiones que implican diferentes criterios en conflicto y múltiples agentes interesados (Belton y Stewart, 2002).

El objetivo del Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) es que el decisor disponga de la máxima información de forma organizada, para un mayor control del proceso de decisión, y que todos los factores influyentes hayan sido considerados, de modo que aprenda sobre el propio problema de decisión y determine sus preferencias. Lo que se pretende con ello es ayudar a pensar de manera sistemática y ordenada sobre problemas complejos para mejorar la calidad de las decisiones que se toman.

En el proceso de toma de decisiones el decisor se encuentra frente distintas posibilidades o alternativas, las cuales constituyen el conjunto de elección. La elección se realiza bajo distintos puntos de vista denominados criterios. Éstos son parcialmente contradictorios ya que dependiendo de los criterios en que se base para la elección la alternativa elegida será distinta. Por este motivo, ni en el análisis multicriterio ni en la realidad, no existe el óptimo en el sentido estricto de la palabra. Cada solución consiste en el compromiso de diversas soluciones, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

Los conflictos entre criterios y la preocupación para una buena elección en la toma de decisiones han estado presentes a lo largo de la historia. Pero fue a finales del siglo XIX y principios del XX cuando a raíz de las investigaciones económicas se estudió la relación entre el comportamiento de los agentes económicos y la economía. Se postulaba que los

agentes económicos buscaban maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresaban su elección. Esa fue la inspiración de la decisión multicriterio.

En 1896 Pareto introdujo un concepto fundamental, la eficiencia. Mostró que en muchas situaciones varios agentes económicos realizaban elecciones distintas y en conflicto, lo cual no obtenía la satisfacción máxima de cada uno de ellos. Ante esta problemática aparecieron las técnicas de decisión multicriterio, cuyo objetivo era hallar el modo de satisfacer al mayor número de agentes económicos, buscando un equilibrio entre los intereses contrapuestos de cada uno de los agentes. Esa solución es conocida como óptimo de Pareto.

Las técnicas de toma de decisión multicriterio han sido materia de estudio desde mitades del siglo XX. Koopmans, en 1951, extendió el concepto de eficiencia introduciendo el vector eficiente y Kuhn y Tucker, en 1951, descubrieron las condiciones que garantizan la existencia de soluciones eficientes en un problema multiobjetivo.

El desarrollo más importante se produjo en las últimas décadas del siglo XX. De 1960 a 1970 se propusieron varios métodos considerados hoy en día como clásicos. Algunos que destacan son la programación por metas, los métodos de decisión de sobreclasificación, etc. Estas ideas pioneras se fueron desarrollando, culminando en 1972 con la celebración de la I Conferencia Mundial sobre toma de Decisiones Multicriterio en Estados Unidos. Según Romero (1993) este evento se puede considerar como el nacimiento del multicriterio, de buscar un equilibrio entre criterios de forma que la alternativa elegida satisfaga al máximo posible los criterios considerados así como el comienzo de un nuevo período en el campo de la ciencia de la decisión.

Durante los años 70 en Estados Unidos se discutió sobre la aditividad de las preferencias, es decir, poder agregar las diferentes funciones de utilidad de cada criterio en una única función, suma de las anteriores. Esta función se tomó como punto de partida del problema de programación matemática multiobjetivo. El fundamento teórico es denominado teoría de la utilidad multiatributo (Multiple Attribute Utility Theory, MAUT), introducida por Von Neumann y Morgenstern en 1944 y extendida en 1965 por Fishburn.

En 1975 aparecieron numerosos perfeccionamientos en las diferentes vías y en los 80 se propusieron varios métodos, por ejemplo el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) del profesor Thomas L. Saaty. Más adelante el mismo profesor generalizó el AHP obteniendo el Proceso Analítico en Red (Analytic Network Process, ANP), permitiendo modelizar problemas más complejos y de una forma más realista.

A principios de los 90 se pueden distinguir tres enfoques distintos en la ciencia de la decisión (Roy y Bouyssou, 1993):

Vía del realismo: existe una realidad cierta, independiente del grado de conocimiento que se tenga de ella, y por lo tanto la función del investigador es descubrirla.

Vía axiomática: trata de encontrar unos principios fundamentales de los que se puede extraer unas consecuencias lógicas que conducirán a la verdad.

Vía del constructivismo: reduce el problema de la toma de decisiones multicriterio a construir una relación de preferencia global sobre el conjunto de alternativas, teniendo en cuenta las características individuales del decisor y que los datos van cambiando a lo largo del proceso de decisión.

Finalmente, fue durante la década de los 90 cuando los métodos de toma de decisión multicriterio empezaron a trascender del ámbito estrictamente académico al ámbito público y empresarial.

2.4.2 Clasificación de los problemas de decisión multicriterio

En este apartado se pretende formular un problema de toma de decisión genérico y desarrollar la clasificación del problema según cuatro criterios.

El problema de decisión, contará con m alternativas a_1, a_2, \dots, a_m y n criterios c_1, c_2, \dots, c_n . Cada criterio está representado por una función de utilidad U_j . La utilidad $U_j(a_i)$, para el criterio j , el decisor estima que tiene la alternativa i , la recoge la evaluación $z_{ij} = U_j(a_i)$ de la matriz de decisión. Cada valor z_{ij} proviene de la construcción de una verdadera función de utilidad o de una evaluación natural si se trata de un criterio cuantitativo. Cada criterio C_j está provisto también de un peso w_j positivo.

La formalización del problema de decisión multicriterio queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Max. } C_j(A_i) &= (C_1(A_i), C_2(A_i), \dots, C_n(A_i)) \\ \text{t.q. } A_i &\in A \end{aligned}$$

Los problemas de decisión se clasifican atendiendo a cuatro criterios (Peris et al., 2002):

- Según el estado del entorno.
- Según el número de criterios de decisión.
- Según la naturaleza de las alternativas.
- Según las características del decisor.

2.4.2.1 Clasificación según el estado del entorno

Según el estado del entorno los problemas de decisión se pueden clasificar en:

- Problemas bajo certidumbre: aquellos en los que se conoce la naturaleza de las alternativas.
- Problemas bajo riesgo de incertidumbre: aquellos en los que existe un factor probabilístico de ocurrencia ligado a las alternativas.

2.4.2.2 Clasificación según el número de criterios de decisión

Según el número de criterios de decisión, los problemas de decisión se pueden clasificar en problemas monocriterios y problemas multicriterio:

- Problemas monocriterio: las decisiones se toman bajo un único criterio.
- Problemas multicriterio: en este tipo de problemas, las decisiones se toman bajo un conjunto de criterios, en los que existe normalmente una contradicción entre alternativas, de forma que la solución eficiente está formada por más de una alternativa y no queda más remedio que encontrar una solución de compromiso.

2.4.2.3 Clasificación según la naturaleza de las alternativas

Según la naturaleza de las alternativas los problemas se clasifican en problemas continuos y problemas discretos.

- Problemas continuos: esos que el conjunto de alternativas no es numerable y están definidas de manera implícita.
- Problemas discretos: el conjunto de alternativas es numerable y puede tratarse de un número finito o infinito.

2.4.2.4 Clasificación según las características del decisor

Según las características del decisor, los problemas de decisión se pueden clasificar en problemas uniexperto y problemas multiexperto:

- Problemas uniexperto: aquellos en que la unidad decisora incluye una sola entidad física o jurídica.
- Problemas multiexperto: la unidad decisora está formada por más de una entidad, un conjunto de individuos interesados en la decisión que tiene adoptar una solución única que refleje globalmente las opiniones o intereses del grupo.

2.4.3 Clasificación de la metodología multicriterio

Según Moreno-Jiménez (1996), las técnicas de decisión multicriterio son un grupo de metodologías que abordan la resolución de problemas de decisión complejos de una forma más realista que los enfoques tradicionales, permitiendo la incorporación de diferentes criterios y visiones de la realidad. A lo largo de los años se han realizado varias clasificaciones de las técnicas de decisión multicriterio, algunas de ellas se presentan bajo estas líneas.

En 1992, Korhonen propuso la clasificación de las técnicas de decisión multicriterio basándose en el flujo de información entre el decisor y el analista. La clasificación quedó ordenada mediante 3 grandes grupos:

- El analista dispone de información completa sobre las preferencias del decisor: cuando el decisor expresa sus preferencias sobre un conjunto de alternativas, se puede asumir la existencia de una función de valor global que agrega las funciones de valor de cada uno de los criterios.

Este es el enfoque clásico que fue adoptado por la teoría de la utilidad multiatributo (MAUT).

- El analista dispone de información nula sobre las preferencias del decisor: en este caso no se tiene la información suficiente sobre las preferencias del decisor para poder construir una función de valor. En este caso es conveniente plantear unas funciones objetivo que hay que optimizar. La resolución del problema implica obtener un óptimo máximo respecto cada uno de los criterios. Como la obtención de este punto ideal es prácticamente imposible se introduce el concepto de solución eficiente u óptimo de Pareto.

Este es el enfoque clásico para la programación matemática multiobjetivo.

- El analista dispone de información parcial sobre las preferencias del decisor: en este caso el analista interactúa con el decisor. Se parte de una solución inicial que el decisor evalúa en base a sus preferencias, las cuales se introducen en el modelo para generar una nueva solución.

Éste es el enfoque clásico adoptado por los métodos interactivos.

Otra clasificación de las técnicas de decisión multicriterio fue la realizada por Pardalos en 1995, donde clasificaba las técnicas en 4 grupos:

- Programación matemática multiobjetivo (Multiobjective mathematical programming).
- Teoría de la utilidad multiatributo (Multiple attribute utility theory).
- Teoría de las relaciones de sobreclasificación (Outranking relation theory).
- Análisis de disgregación de preferencias (Preference disaggregation analysis).

El primer grupo, la programación matemática multiobjetivo, es adecuada para resolver problemas de decisión continuos, en los cuales se pretende llegar a un conjunto de soluciones eficientes. Las otras tres categorías se aplican habitualmente en problemas de decisión discretos con el objetivo de seleccionar, ordenar o clasificar las alternativas. Debajo estas líneas se muestran las distintas técnicas de decisión multicriterio agrupadas según la clasificación que se ha descrito.

TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO	Métodos multicriterio ordinales	
	Programación matemática multiobjetivo	Método de las restricciones
		Programación compromiso
		Método de las ponderaciones
		Programación por metas
	Teoría de la utilidad multiatributo	Suma ponderada
		Producto ponderado
		Proceso Analítico Jerárquico (AHP)
		Proceso Analítico en Red (ANP)
		Métodos PRES y PRES II multiexperto
	Teoría de las relaciones de sobreclasificación	Métodos ELECTRE
		Métodos PROMETHEE
	Análisis de disgregación de preferencias	Método UTA

Tabla 2.1 Metodología en la decisión multicriterio

2.4.4 Métodos de ponderación

Normalmente en la toma de decisiones multicriterio, el decisor no considera todos los criterios con la misma relevancia o importancia. Para ello existen las medidas de la importancia relativa que los distintos criterios tienen para el decisor, se denominan pesos o ponderaciones. Los valores que asigne el decisor a estos pesos van a influir directamente y de forma determinante en el resultado final del análisis. Por este motivo es de suma

importancia que el decisor evalúe los pesos de forma que reflejen lo más fielmente posible sus preferencias.

Para la asignación de los pesos existen diferentes métodos que se explican a continuación:

2.4.4.1 Método de asignación directa

Se trata del método más sencillo de todos los que se describen. El método consiste en asignar los pesos a los criterios considerados en la toma de decisión de forma directa, sin ningún cálculo previo, de forma que la suma de todos los porcentajes sea 100%. Este porcentaje es la medida de la importancia relativa respecto el conjunto de todos los criterios considerados en la toma de decisión.

Se trata de un método sencillo pero puede ser poco preciso si la cantidad de aspectos a valorar es elevado.

2.4.4.2 Método de ordenación

Esta metodología consiste en realizar una clasificación y ordenación de los criterios según la importancia o preferencias que tenga el decisor. Cuando los criterios han sido ordenados según preferencias se proponen las diferentes ecuaciones para la obtención de los pesos de cada criterio.

La ventaja de éste método es su sencillez y los pocos cálculos que requiere la obtención de los pesos. Estas ventajas se ven contrastadas con los siguientes inconvenientes:

Puede existir una limitación intrínseca para que los pesos puedan tomar valores en todo el rango $[0,1]$.

Se tiene en cuenta la preferencia del criterio i -ésimo sobre el j -ésimo, pero no se tiene en cuenta la intensidad con la que el criterio i -ésimo es preferido al j -ésimo.

Puede resultar complicado la ordenación simultánea de los n criterios cuando n empieza a ser un número elevado. También puede resultar dificultoso cuando varios criterios tienen importancias parecidas para el decisor.

2.4.4.3 Métodos de comparación a partir de una sola referencia

La comparación a partir de una sola referencia consiste en comparar la importancia de cada criterio evaluado con uno de referencia o a partir de una escala de referencia de medida previamente definida. Los distintos métodos que utilizan este recurso se distinguen en la forma de cómo se relaciona un criterio con los demás.

La ventaja de estos métodos es que permite mejores aproximaciones que el método directo. Independientemente del número de criterios a evaluar, si la importancia de éstos respecto el criterio escogido de referencia o la escala previamente definida es conocida, los pesos calculados pueden ser muy precisos. También tienen en cuenta el grado de intensidad con que el criterio i -ésimo es preferido al j -ésimo y los pesos no se concentran entre un valor mínimo y un valor máximo.

Por contra, estos métodos exigen más información del decisor que en el método de ordenación simple.

2.4.4.4 Método de comparaciones sucesivas

Este método fue originalmente propuesto por Churchman y Ackoff en 1954. Se trata de un método que combina algunas características de las técnicas anteriormente explicadas. Se basa en la comparación sistemática de la importancia de cada criterio con sucesivos grupos de los criterios que le siguen en importancia contrastando la coherencia de los valores numéricos preasignados a los pesos.

En 1978 se realizó una versión mejorada llevada a cabo por Knoll y Engelberg. Ésta mejora consiste en los siguientes pasos:

- Ordenación de los criterios.
- Tasación de los pesos en una escala cardinal.
- Comparación de cada criterio con sucesivos grupos de los criterios que le siguen en importancia hasta que haya un cambio de preferencias.
- Contraste de los pesos preasignados a los criterios con las comparaciones del paso anterior.
- Modificación de los valores incoherentes para que los pesos no contradigan las comparaciones anteriores.
- Normalización de los valores a sumo uno.

2.4.4.5 Método de comparación de alternativas

Estos métodos tratan de obtener información sobre los pesos a partir de comparaciones binarias globales de las alternativas. Los distintos métodos que siguen esta metodología son: el método de compensación, el método de asignación por precios y el método del vaivén.

2.4.4.6 Cálculo de la diversidad de las valoraciones

En los métodos de la diversidad de las valoraciones, los pesos son determinados según las valoraciones de las alternativas respecto de cada uno de los criterios sin que influyan las preferencias del decisor. Esto implica que los pesos no son una medida de las preferencias del decisor y por lo tanto tampoco son independientes de las valoraciones de las alternativas.

El método asigna mayor importancia a un criterio cuando existe mayor diversidad en las evaluaciones de las alternativas respecto a ese criterio ya que posee mayor poder de discriminación entre las alternativas. Para reflejar y medir esta diversidad, las distintas metodologías basadas en la diversidad de las valoraciones utilizan distintas variables.

2.4.4.7 *Matriz de dominación*

Este método consiste en establecer comparaciones binarias entre criterios. Para ello se construye una matriz que compara la importancia del criterio de la fila i -ésima con todos los demás situados en columnas. Si el criterio C_i domina al criterio C_j se asigna el valor 1 a la entrada correspondiente de la matriz de dominación. Por lo contrario se le asigna un 0. La suma de los valores de la fila i -ésima indica el orden del criterio C_i en la ordenación final de los criterios. Por lo tanto, el criterio que reciba un valor mayor será el criterio con mayor prioridad y el de menor valor el menos importante.

Entonces, para ponderar los criterios, se suele ordenar los criterios por orden de importancia relativa sobre una escala. De esta forma se le asigna un valor al criterio clasificado en el primer lugar de la ordenación y se le asigna al resto de criterios valores relativos. La escala de valor correspondiente será la ponderación relativa de los criterios.

MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DE PESOS	Método de asignación directa	
	Métodos de ordenación. Factor de importancia	Método de inversa del ranking
		Método de posición en el ranking
	Métodos de comparación a partir de una sola referencia	Método de las proporciones
		Método de tasación simple
	Método de comparaciones sucesivas	
	Métodos de comparación de alternativas	Método de compensación
		Método de asignación por precios
		Método de vaivén o swing method
	Cálculo de la diversidad de las valoraciones en cada criterio	Método de la entropía
		Método CRITIC
	Matriz de dominación	
	Método a partir de la matriz de comparación por pares o escala de ratio (basado en comparaciones binarias de los criterios)	Media aritmética
		Media geométrica
Métodos basados en el vector propio		
Métodos extremos		

Tabla 2.2 *Métodos de ponderación de variables o asignación de pesos.*

2.4.5 Principio de composición jerárquica

Una vez los criterios están determinados es necesario estructurarlos de forma que sean comprensibles y fáciles de tener en cuenta para el análisis. Una metodología natural de hacerlo fue propuesta por Manheim y Hall en 1976, y fue mediante una jerarquía en forma de árboles.

Estos árboles pueden clasificarse en dos tipologías. Se habla de un árbol de valores cuando el conocimiento es seguro y lo central son los valores de los atributos. En cambio se habla de árbol de decisión cuando existen varias decisiones encadenadas.

2.4.5.1 *Árbol de valores*

Un árbol de valores, por lo general, está formado de varios niveles en la ramificación, a la vez que cada ramificación puede subdividirse en subniveles. En los primeros niveles se encuentran los aspectos más cualitativos y generales, los cuales se llaman requerimientos. Los niveles intermedios se denominan criterios y subcriterios. Al final de toda la estructura encontramos los indicadores, éstos son más concretos y son valorados directamente.

Se recomienda no realizar más de 3 o 4 ramificaciones. Tampoco que el número de indicadores sea superior a 20. Si esto sucediera, la valoración de todos los indicadores restaría importancia a aquellos que realmente lo son.

Al crear la estructura que se ha descrito se debe tener en cuenta y comprobar que:

- El árbol debe ser completo y exhaustivo sin dejar ningún aspecto importante.
- Debe ser operativo, todos los indicadores deben poderse medir y ser evaluados para cada alternativa.
- La estructura no debe ser redundante, se debe evitar que las propiedades no se repitan. Eso se consigue eligiendo indicadores que sean independientes entre sí.
- Los indicadores deben ser discriminantes, es decir, que realmente comparen las distintas alternativas y así no resten importancia a aquellos indicadores que realmente sirven para comparar bien las alternativas.

2.4.5.2 *Árbol de decisiones*

Esta estructuración permite al decisor optar por distintas alternativas durante el proceso de decisión. Hay momentos donde existe la posibilidad en la que puede elegir entre distintos caminos. En la Figura 2.1 se representa como un cuadrado para representar ese momento de elección. Del cuadrado se derivan distintas ramas que representan distintas acciones. El decisor en ese momento sólo puede elegir una de ellas, y por lo tanto ambas ramas no tienen probabilidades asociadas.

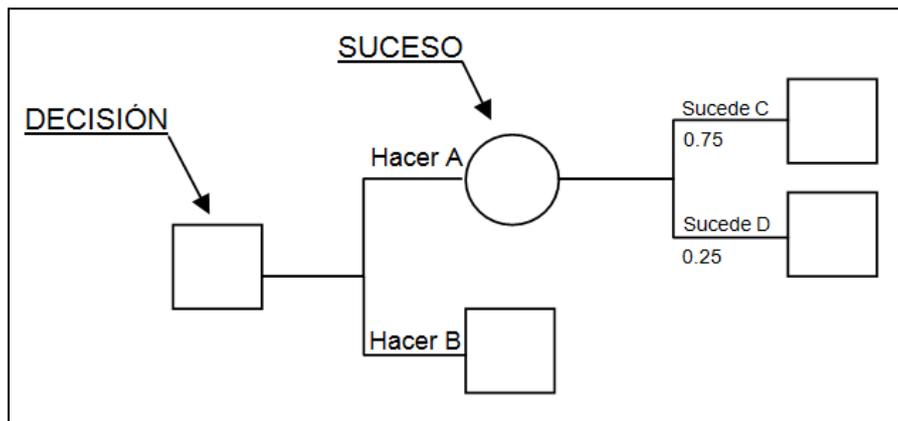


Fig. 2.1 Árbol de decisión tipo.

Esta metodología es utilizada en esos casos con incertidumbre, en caso de decisiones encadenadas y con probabilidades asociadas. Ésta no es la situación no se contempla en el estudio de esta tesina y por lo tanto no es aplicable y no se entrará en más detalle.

2.4.6 Técnicas de decisión multicriterio

Las técnicas de decisión multicriterio son metodologías para la resolución de problemas de decisión complejos. Las distintas técnicas fueron agrupadas por Pardalos en cuatro grupos: programación matemática multiobjetivo, teoría de la utilidad multiatributo, teoría de las relaciones de sobreclasificación y análisis de disgregación de preferencias.

En el siguiente apartado se profundiza en la teoría de la utilidad multiatributo debido a que la herramienta que se pretende desarrollar esta tesina se basa esta basada en ella.

2.4.6.1 Teoría de la utilidad multiatributo

Keeney y Raiffa (1976) desarrollaron la teoría de la utilidad multiatributo (Multiple Attribute Utility Theory, MAUT) a partir de la teoría unidimensional de Von Neumann y Morgenstern (1944). Esta teoría utiliza una función que integra los distintos criterios del problema, generalmente en conflicto, reduciendo el problema multicriterio a un problema de optimización monocriterio.

Función de valor

Cuando el problema se plantea en un ambiente de certidumbre y se conoce las consecuencias de cada acción, la función empleada es denominada función de valor. Se denomina función de utilidad en el caso que el ambiente es de incertidumbre y el decisor no conoce las consecuencias de cada alternativa. Las dos funciones son la medida de satisfacción del decisor con respecto a la respuesta que produce una alternativa a un indicador.

El principio de racionalidad de la teoría se basa en los siguientes principios:

- El decisor intenta inconscientemente o implícitamente maximizar una función de utilidad o valor que agrega todos los puntos de vista relevantes. Si se interroga al decisor sobre sus preferencias, sus respuestas serán coherentes con la función de valor, que no es conocida a priori. El papel del analista es estimar dicha función mediante una adecuada serie de preguntas.
- Todo par de alternativas A_1 y A_2 pueden ser comparadas. Existe un ordenamiento de preferencia sobre el conjunto de alternativas de modo que para todo par de alternativas se tiene alguna de las siguientes opciones:
 - El resultado A_1 es preferido al resultado A_2 ($A_1 > A_2$)
 - A_1 es indiferente a A_2 ($A_1 \sim A_2$)
 - El resultado A_2 es preferido al resultado A_1 ($A_2 > A_1$)
- Se asume que el orden de preferencia es transitivo, es decir, si se prefiere A_1 a A_2 y se prefiere A_2 a A_3 , entonces se prefiere A_1 a A_3 . Este principio junto con el anterior garantizan la consistencia en la comparación.

El grado de cumplimiento de los objetivos por parte de las alternativas A se caracteriza por un conjunto de atributos Z . No se pueden comparar las magnitudes del atributo z_j con las del atributo z_k , para $j \neq k$, porque en la mayoría de los casos cada criterio se mide en unidades diferentes (Keeney y Raiffa, 1976).

Se define función de valor como una función $V: A \rightarrow \mathbb{R}$ que asocia un número real a cada alternativa. Si la alternativa A_1 se prefiere a la alternativa A_2 entonces $V(A_1) > V(A_2)$. Es decir, cuando una alternativa se prefiere a otra, el valor asociado a la primera es mayor que el valor asociado a la segunda. Se asume que V es una función continua en A (Yu, 1985).

Una vez establecida la función de valor V , el problema de decisión se reduce a calcular:

$$\text{Máx. } V(Z(A))$$

$$\text{Donde: } Z(A) = (z_1(A), z_2(A), \dots, z_n(A))$$

Construcción de la función de valor

Para encontrar la función de valor, Ríos (1989) propuso la metodología siguiente para construirla:

- Verificar las condiciones de existencia de la función de valor.
- Seleccionar la forma más adecuada de la función de valor.
- Construir la función de valor a partir de la estructura preferencial revelada por el decisor.
- Contrastar la coherencia de la representación de las preferencias.

Para construir la función de valor el decisor indica las alternativas situadas en posiciones notables de una escala del valor. Frecuentemente esta escala de medida del valor se mide entre 0 y 1. Normalmente se sitúa primeramente la peor alternativa y después la mejor, lo que aporta los puntos extremos de la escala. A continuación se procede situando las otras alternativas teniendo en cuenta las diferencias de preferencias.

La función puede presentar distintas tendencias:

- Creciente: la satisfacción del decisor aumenta con un aumento del valor del indicador.
- Decreciente: la satisfacción del decisor disminuye a medida que aumenta el valor del indicador.
- Mixta: la máxima satisfacción del decisor se produce en puntos medios del valor del indicador y la máxima insatisfacción en puntos extremos.

Además, la función de valor puede presentar varias formas:

- Lineal: presenta un incremento o decremento de valor constante a lo largo del rango de respuesta de las alternativas.
- Convexa: presenta un gran aumento de valor para respuestas cercanas a la que genera el mínimo valor si la función es creciente o un gran decremento de valor para respuestas cercanas al mínimo valor si la función es decreciente.
- Cóncava: muestra un gran aumento de valor para respuestas cercanas a la que genera el máximo valor si la función es creciente o un gran decremento de valor para respuestas cercanas al mínimo valor si la función es decreciente.
- En "S": el incremento o decremento de valor máximo se produce en la parte central del rango de respuestas mientras que es menor en los puntos cercanos al máximo y al mínimo.

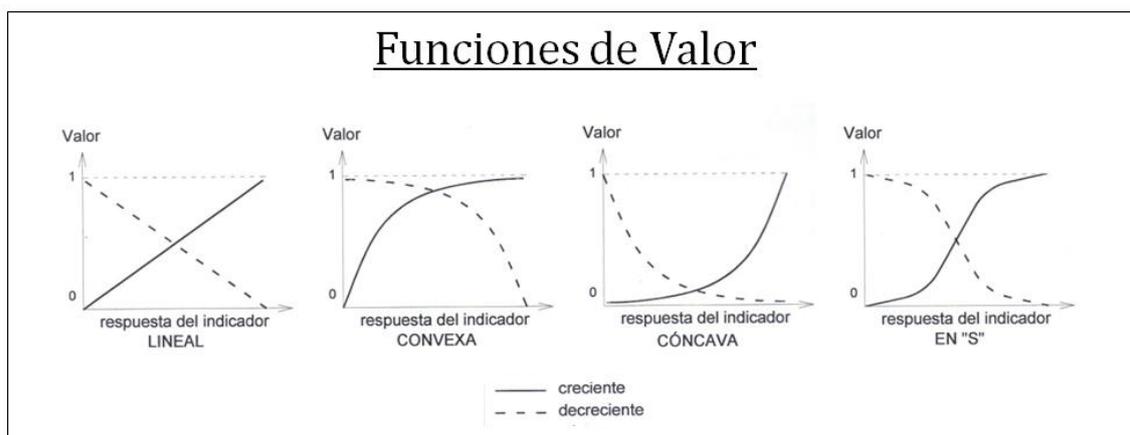


Fig. 2.2 Representación de diversos tipos de función de valor combinando diferentes tendencias y formas.

Existen diferentes métodos para construir la función de valor. Algunos de ellos determinan varios puntos de la función y a partir de allí interpolan, otros parten de expresiones matemáticas predefinidas.

En este apartado, de todos los métodos existentes, se desarrolla el método basado en la expresión matemática de la herramienta MIVES ya que será utilizado en apartados posteriores.

Expresión de la herramienta MIVES

La herramienta MIVES propone una expresión para modelar la función de valor como la que se muestra a continuación:

$$V_{ind} = A + B \cdot \left[1 - e^{-k_i \cdot \left(\frac{|x_{ind} - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

Donde:

- A es el valor que genera la abscisa “inf”, generalmente A=0.
- $X_{mín}$. abscisa del indicador que genera un valor igual a “A”.
- X_{ind} abscisa del indicador evaluado que genera un valor V_{ind}
- P_i factor de forma que define si la curva es cóncava, convexa, recta o con forma de “S”. Determina la pendiente de la curva en el punto de inflexión de coordenadas (C_i , K_i)
 - $P_i < 1$ para curvas cóncavas
 - $P_i > 1$ para curvas convexas o curvas en “S”
 - P_i tiende a 1 para rectas
- C_i establece, en curvas con $P_i > 1$, el valor de la abscisa en el que se produce el punto de inflexión.
- K_i define el valor de la ordenada del punto C_i .
- B es el factor para que la función se mantenga en el rango (0.00 , 1.00) y hace que siempre la mejora respuesta tenga un valor igual a 1. Viene definido por la expresión:

$$B = \frac{1}{1 - e^{-k_i \cdot \left(\frac{|x_{max} - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}}}$$

- X_{max} es la abscisa del indicador que genera un valor igual a 1.

La ventaja de este método es que todas las variables de la función valor tienen sentido físico, lo que hace que resulte una herramienta manejable y la expresión matemática determina la función valor en todos sus puntos. Para un análisis detallado del comportamiento de la función se puede consultar el trabajo de Manga, 2005, donde se establecen intervalos de las variables P_i , C_i y K_i para tomar una forma determinada.

2.5 HERRAMIENTAS MULTICRITERIO EXISTENTES PARA LA EVALUACIÓN SOSTENIBLE

Las técnicas multicriterio, a lo largo del tiempo, han provisto a distintos sectores de herramientas para la ayuda de la toma de decisión. Cada herramienta ha sido desarrollada desde distintas perspectivas y de acuerdo con las necesidades y características del país de origen. En el sector de la construcción se han creado herramientas de nivel general y otras se han desarrollado en torno a la sostenibilidad. Éstos últimos serán objetivo de estudio en éste apartado por el gran interés de esta tesina en el desarrollo de una metodología sostenible para el análisis y comparación de pilares de edificación.

Una de las principales diferencias con todas las herramientas que se predefinirán, es que hasta la fecha las propuestas existentes realizan una evaluación de la sostenibilidad, de forma más sencilla o compleja, en un edificio. La tesina pretende realizar dicha evaluación sólo en un elemento de la estructura del edificio para realizar una buena discriminación en casos más concretos.

Los métodos de evaluación ambiental emergieron desde comienzos de los años 90 con la herramienta BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). Desde esa fecha hasta la actualidad han aparecido grandes cambios y transformaciones en los mecanismos de evaluación que han provisto de experiencia y conocimientos suficientes para la aparición y desarrollo de nuevas metodologías.

Las distintas herramientas existentes se pueden clasificar en tres distintos niveles (Trusty 2001):

- Nivel 1: Herramientas de comparación o fuente de información de productos.
- Nivel 2: Herramientas de diseño o de soporte de decisión.
- Nivel 3: Herramientas que realizan una evaluación del edificio por completo.

A continuación se recogen algunos de los distintos métodos de evaluación existentes y se realiza una breve explicación de cada uno de ellos. Esta información es relevante para el aporte de experiencia e información para el desarrollo de la metodología que se pretende alcanzar en esta tesina.

2.5.1 Métodos de evaluación

Las herramientas que se han desarrollado alrededor de la sostenibilidad surgieron a raíz de la aparición de la herramienta BREEAM a principios de los años 90.

Actualmente existen en el mercado una cantidad importante de métodos para evaluar el rendimiento medioambiental de los edificios. La importancia que se le está dando a estos métodos de evaluación de edificios sustentables se ha incrementado y diversificado notablemente. Primeramente se crearon para medir y evaluar el rendimiento ambiental de la construcción pero cada vez más se han desarrollado estas herramientas para establecer líneas y estrategias específicas para el diseño. A continuación se presentan algunos ejemplos de las herramientas existentes y se realiza una breve descripción de ellas.

2.5.1.1 BREEAM

BREEAM es una metodología de evaluación medioambiental de edificios cuya evaluación se realiza en la etapa de diseño. Existen varias versiones de esta metodología, adaptándose fácilmente a las normativas y condiciones particulares de cualquier territorio. Actualmente existen versiones específicas para el Reino Unido, Europa y el Golfo Pérsico. La herramienta BREEAM se adapta a las necesidades de cualquier país o región abordando las siguientes cuestiones:

- Categorías de los diferentes contenidos medioambientales.
- La importancia medioambiental de cada categoría.
- Particularidades de cada método de construcción, productos y materiales.
- Referencias a normativas regionales, estándares y guías ejemplares.

El método BREEAM se basa en la otorgación de puntos, que se agrupan en categorías, donde se enmarcan los distintos requisitos disponibles, que pueden ser cumplidos según la estrategia seguida en el edificio. Para los datos cuantitativos se toman como datos base los proporcionados por las agencias estatales, guías de especificación de materiales o consultoras.

Los puntos obtenidos en cada categoría pasan por un factor de ponderación medioambiental que tiene en cuenta la importancia relativa de cada área de impacto.

Los resultados de cada categoría se suman para producir una única puntuación global. Una vez se conoce la puntuación global del edificio, se traduce a una escala de cinco rangos, que da el grado de cumplimiento BREEAM. A la calificación obtenida anteriormente, se otorga un certificado que puede ser utilizado con fines promocionales o comerciales.

Usa como metodología Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) cuyo objetivo es obtener una función general de utilidad, la cual provee un índice o medida para un set de opciones. Para esta función es deseable que pueda capturar la mayor parte de preferencias. Combina la información extraída de expertos con valores extraídos de usuarios y propietarios. Usa el análisis de sensibilidad como punto para evaluar los efectos de pequeños cambios en factores escalados, actitudes constantes de riesgo, costo de vida y alguna otra variable de

incertidumbre. La escala usada no es común por tanto los créditos asumidos no tienen el mismo valor, sin embargo, el número total de créditos provee una indicación general del funcionamiento ambiental en el diseño de la edificación. Los créditos evaluados son otorgados de acuerdo al desempeño ambiental en un rango de criterios para cada una de las categorías. Se aplica adicionalmente un sistema de pesos con el fin de determinar la evaluación final. El sistema de pesos aplicados es el resultado de la consulta de expertos y profesionales.

2.5.1.2 *BEES*

Esta herramienta nacida en Estados Unidos de América ayuda a seleccionar productos que generan el menor impacto ambiental en componentes de oficinas comerciales y viviendas, proporcionando puntuaciones ambientales y de costos. Utilizando como plataforma el programa Visual Basic, enfoca sus categorías de trabajo en datos ambientales a pesar de que el resultado de la evaluación lo hace desde la perspectiva económica y ambiental.

BEES mide y combina el producto ambiental y el rendimiento económico en un único valor organizado en una estructura jerárquica que considera 75 elementos de la edificación.

Como datos de entrada utiliza datos cualitativos del porcentaje económico y ambiental que se desea. Estos datos se basan en datos de la EPA y de Harvard Studies. La medida del rendimiento ambiental se hace utilizando la norma ISO 14000.

Como resultado combina gráficamente, a partir de diagramas de barras, datos económicos y ambientales. Se obtiene un daño relativo con respecto a sus categorías y no un daño ambiental absoluto como consecuencia de no utilizar datos absolutos. Por ello no se puede decir que un producto sea mejor que otro.

La evaluación se realiza asignando diferentes pesos a las categorías ambientales y económicas hasta llegar a un valor único para tomar la decisión. La derivación de pesos se basa en la importancia relativa de cada impacto (Todd and Geisser, 1999). Para la evaluación usa la técnica de multiatributos MADA, colocando todas las categorías sobre la misma escala para luego normalizarlas. El valor final puede ser interpretado en unidades monetarias.

Finalmente, el método es flexible en permitir que los usuarios modifiquen a su juicio requisitos particulares sobre los parámetros dominantes de la evaluación, tal como los pesos de la categoría que determinan las consecuencias para el medioambiente. Es también transparente en la documentación de los datos de soporte de funcionamiento y algoritmos computacionales (Lippiat 1999).

2.5.1.3 *GBC (Green Building Challenge)*

El Green Building Challenge constituye una herramienta de evaluación para la edificación sostenible a nivel mundial, fruto de un proyecto de cooperación internacional impulsado por el IISBE (International Initiative for a Sustainable Built Environment). El objetivo de esta iniciativa fue el desarrollo y aplicación de un método de evaluación del comportamiento medioambiental de los edificios.

Se trata de un sistema jerárquico de criterios de evaluación ambiental desarrollado para propósitos de comparación internacional en orden de seleccionar y analizar el funcionamiento ambiental y el impacto de las edificaciones. Los criterios de selección aplicados tienen en cuenta los indicadores más relevantes contemplados en la GBTool como, entre otros, la calidad del ambiente interior, las medidas medioambientales de diseño pasivo, las cargas ambientales, el consumo de recursos y replicabilidad.

El resultado de GBC está basado sobre una comparación de condiciones locales estándar y no en proyectos de otras ciudades. El resultado se presenta en forma gráfica no solo por categoría si no en una evaluación global de la edificación. Además de esta evaluación, presenta un conjunto limitado de medidas absolutas del rendimiento que caracterizan las prácticas de sostenibilidad del edificio y que facilitan la comparación internacional o de estándares del país.

Como estructura el Green Building Challenge tiene en cuenta 4 clasificaciones: categorías, subcategorías, criterios y subcriterios. Los datos iniciales se basan en valores fijados en hojas de trabajo. Estas hojas, constituyen el soporte de lo que son los pesos ponderados para los criterios y los subcriterios. Mucho de estos valores se obtienen mediante el uso de fórmulas o bien son valores aportados por organizaciones gubernamentales. Con respecto a los pesos ponderados de los niveles más altos, vienen fijados por los equipos nacionales o grupos especializados y que son establecidos en la hoja de trabajo. Los perfiles de salida provienen de las valoraciones de subcriterio, la categoría del valor proporcional del criterio y la cuestión de la valoración de la categoría. El valor total se obtiene mediante la valoración proporcional de las cuestiones o categorías mayores.

El mecanismo de evaluación se organiza de la forma que se explica a continuación. El método está dividido por categorías, subcategorías, criterios y subcriterios. Las dos primeras jerarquizaciones son parámetros asignados por un equipo especializado y los criterios se puntúan de -2 hasta +5. La valoración total del edificio se efectúa de acuerdo a los parámetros definidos por el criterio y subcriterio respectivamente. Estos criterios son valorados cuantitativamente. Los dos niveles superiores son cualitativos y por tanto se basan en evaluaciones subjetivas.

La herramienta GBC presenta la desventaja que no evalúa la edificación durante condiciones operacionales. No funciona como herramienta de simulación si no como un marco de trabajo.

2.5.1.4 GREEN GUIDE TO SPECIFICATION

La Green Guide to Specification se trata de una guía de especificación de fácil uso basada en datos numéricos. Ésta mide impactos ambientales de materiales de construcción en término de 13 parámetros.

La metodología presenta los materiales y los componentes en su forma elemental de construcción. Ellos son comparados como componentes con el criterio de satisfacer o bien las mismas funciones o similares.

Entonces los datos de un perfil ambiental son trasladados a unas etiquetas específicas para hacer básicamente comparaciones entre materiales y componentes.

El resultado obtenido con el uso de esta herramienta es una evaluación del impacto ambiental o de los materiales usados de acuerdo a una escala pre-establecida. El sistema de clasificación de categorías usado es:

- A: Se iguala por lo menos el impacto ambiental esperado.
- B, C: Disminuye gradualmente el impacto ambiental.

Esta herramienta sirve de soporte para el diseño de edificios “verdes” desde el punto de vista del análisis del ciclo de vida, ofreciendo a los usuarios una evaluación de aspectos ambientales para la fase de diseño.

El resultado se obtiene mediante la introducción y descripción de los tipos y propiedades de los materiales utilizados y las cuantías necesarias, consumo de recursos, etc.

La estructura general se compone de dos categorías cada una de las cuales se subdivide en subáreas.

El mecanismo de evaluación funciona mediante la programación de ecuaciones, las cuales calculan el material de consumo y muestra el impacto sobre ellos.

El resultado viene expresado en forma de gráfica junto a una tabla resumen de todos los impactos por cada etapa del ciclo de vida. Los resultados son también presentados en términos de energía, emisiones de gas expresadas en toneladas equivalentes de CO₂, cantidades de agua, NO_x, SO_x, etc.

2.5.1.5 LEED (Leadership in Energy Environmental Design) Green Building Rating System

LEED es una guía útil para el diseño sostenible y verde basada en normas estándar de los Estados Unidos de América. Esta guía evalúa el rendimiento y funcionamiento en edificios sostenibles, desarrolla proyectos nuevos y existentes. Finalmente también evalúa construcciones comerciales.

Esta herramienta está estructurada en 7 categorías distintas y 60 indicadores individuales, utilizando un mecanismo de puntos acumulables. Las 7 categorías que se han mencionado son:

- Sustainable sites
- Water efficiency
- Energy and atmosphere
- Materials and resources
- Indoor environmental quality
- Innovation
- LEED accredited professional

Para la obtención del resultado final, el sistema contiene una serie de restricciones o requisitos lo cual da la posibilidad de obtener créditos basados en el nivel de

satisfacción de los criterios seleccionados. Usando los créditos del sistema hay 4 niveles del edificio que pueden ser certificados:

- LEED – certified (necesario una obtención de 26 - 32 puntos).
- Silver level (necesario una obtención de 33 - 38 puntos).
- Gold level (necesario una obtención de 39 - 59 puntos).
- Platinum level (necesario una obtención de 52 - 69 puntos).

2.5.1.6 ECOPROP

ECOPROP se trata de una herramienta de gestión desarrollada por VTT (Huovila 2001, Leihonen 2001). Esta herramienta evalúa la eco-eficiencia de la edificación a partir de una serie de indicadores que toman en cuenta su rendimiento y las categorías ambientales. Se usa para evaluar viviendas, hospitales, y grandes almacenes.

ECOPROP utiliza datos de entrada tanto cuantitativos como cualitativos. Como cuantitativos encontramos datos de condiciones internas, condiciones de servicio, seguridad, ciclo de vida, etc. Los datos cualitativos de entrada utilizados son de confort, accesibilidad y usabilidad.

Mediante estos datos se asignan valores a los requerimientos necesarios. Al final se obtiene una puntuación por cada categoría y se comparan dichos valores con respecto a un nivel.

2.5.1.7 MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible)

La metodología multicriterio MIVES permite obtener un único índice de valor que mide el grado de sostenibilidad del material o proceso evaluado.

El funcionamiento de la herramienta consiste en 7 fases:

- Delimitación de la decisión
- Introducción del árbol de toma de decisión
- Creación de las funciones de valor
- Asignación de pesos
- Definición de las alternativas
- Valoración de las alternativas
- Realización de un análisis de sensibilidad

Estas fases permiten dotar al método de objetividad y claridad en todos los procedimientos. Las decisiones se toman al inicio, cuando se definen los aspectos que se tendrán en cuenta y cómo serán valorados. Este planteamiento permite que la decisión se

tome sin ninguna influencia de las valoraciones de las alternativas, evitando que se produzca cualquier tipo de subjetividad.

Otra ventaja es que permite estudiar la sostenibilidad de otras alternativas a cualquier persona a partir del modelo de valoración creado.

Finalmente, todos estos métodos que se han explicado y los otros existentes, en su gran mayoría se concentran en la evaluación de los impactos físicos sobre el entorno. Lo que pretenden estos métodos es la posibilidad de mejorar el proceso de toma de decisiones. Mientras que la norma establecida ha de cumplirse, la mayoría de estos métodos son voluntarios y están enfocados a incentivar entre constructores y sobre todo dueños y promotores, las prácticas sostenibles en materia del entorno construido en lo general y de la arquitectura en lo particular.

2.6 SÍNTESIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y APORTACIONES

De acuerdo al estado del conocimiento expuesto a lo largo del capítulo, se identifican dos puntos que constituyen la aportación de esta tesina. Estos hacen referencia a la constitución de una nueva visión metodológica para el análisis sostenible de un edificio y a la creación de una herramienta para la evaluación de pilares de edificación.

En primer lugar, actualmente existen una gran variedad de herramientas dedicadas al análisis sostenible en base a distintos métodos de toma de decisión. Todas estas herramientas, que han sido nombradas a lo largo del capítulo, permiten el análisis de todo un proyecto y lo evalúan mediante criterios sostenibles. Es decir, realizan una valoración de la sostenibilidad tomando como sistema el edificio en su totalidad.

Por lo contrario, al iniciar esta tesina se considera que en determinadas situaciones, un análisis global de todo un edificio no consigue una correcta discriminación o análisis sostenible para situaciones más concretas o locales, como pueden ser los. Por consiguiente, esta tesina pretende abrir una nueva vía de análisis, el estudio y valoración sostenible de las distintas unidades de obra por separado para así, realizar una buena discriminación entre las distintas soluciones posibles. Para ello, y como modo de ejemplo, la tesina se centra en los pilares de edificación.

Mediante este enfoque del análisis de sostenibilidad de una edificación se pretende:

- Desarrollar una herramienta, fundamentada en la toma de decisión, para comparar distintas alternativas de pilares de edificación estándar. Esta herramienta asignará un valor a cada solución de pilar que se analice bajo el punto de vista de la sostenibilidad. Así, el elemento estructural con una mejor valoración (mayor puntuación) será la solución más sostenible y por lo tanto la más adecuada a ejecutar.

Para el desarrollo de esta herramienta hay que destacar:

- El desarrollo de un árbol de valores que ayudará a la estructuración del problema y permitirá guiar al decisor en el análisis de cada una de las alternativas.
- La estimación de los pesos para cada nivel de jerarquía del árbol de valores. Esta estimación se realizará mediante el método de asignación directa celebrando un seminario con varios agentes del sector de la construcción que aportarán sus conocimientos, opinión y sus diferentes puntos de vista.
- La definición de una función de valor para cada uno de los indicadores del árbol. Estas funciones permiten normalizar cada uno de los indicadores asignándoles un valor entre 0 y 1 y, mediante los distintos pesos, hallar una valoración final para cada una de las alternativas, permitiendo así una fácil comparación entre ellas.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DEL MÉTODO

3.1 INTRODUCCIÓN

En el diseño de la estructura de una edificación existen distintas alternativas para resolver un mismo problema de solicitaciones. La mayor parte de las soluciones son técnicamente posibles, la única distinción será como se realiza cada alternativa y que repercusiones asociadas tiene cada una de las distintas soluciones.

Al final sólo una de las posibles alternativas será llevada a la realidad con todas las ventajas e inconvenientes que le estén asociados. Frente a esta situación se presenta un problema de toma de decisión, ¿qué alternativa es la mejor de todas ellas? La base para resolver estas preguntas reside en los criterios y prioridades del decisor.

En este capítulo se plantea el desarrollo de una metodología de toma de decisión para comparar distintas soluciones de pilares de edificación estándar de una forma sistemática. Se pretende alcanzar un método de comparación de las distintas soluciones donde todas ellas resuelven el mismo sistema. Para la toma de decisión, esta tesina considera que la mejor solución será la más sostenible, es decir, la que consiga el mejor equilibrio entre tres factores básicos: el medioambiente, la sociedad y la economía.

Para el desarrollo de esta metodología se utilizarán técnicas que ayuden a sintetizar y objetivizar la toma de decisión. En el estado del conocimiento se han presentado diversos métodos y herramientas que abordan el tema de la toma de decisiones desde distintas perspectivas. Estas técnicas que se aprovecharán, se basan en aplicaciones jerárquicas que se fundamentan en estimar y valorar distintos atributos para obtener al final una puntuación de cada una de las alternativas.

En base a lo expuesto, los objetivos de este capítulo son los siguientes:

- Establecer el marco y los criterios que se seguirán para el desarrollo de la metodología en estudio.
- Establecer la metodología para evaluar diferentes alternativas de pilares de edificación a partir de un índice de valor.
- Establecer y caracterizar el análisis del método definiendo un árbol de valores y los pesos de cada uno de los niveles jerárquicos.
- Establecer la función de valor tipo para la cuantificación de los indicadores.

3.2 BASES DEL MÉTODO

Para el desarrollo de la nueva metodología que se plantea, se debe establecer, primero de todo, el marco en el cual trabajará el método y bajo que conceptos se sentarán sus bases.

3.2.1 Universo del modelo

El universo del modelo pretende establecer los límites de estudio de la metodología que se desarrolla en esta tesina.

Para focalizar el estudio, la metodología se centrará en la comparación de pilares de edificación convencional para así poder elegir la mejor opción posible para una situación de solicitudes determinada.

Por lo tanto, los límites de estudio para el desarrollo del método no irán más allá de los pilares presentes en la estructura de un proyecto de edificación, despreciando otros elementos estructurales que pueden encontrarse en edificación.

Los pilares que conforman el grupo de alternativas se caracterizarán por:

- Sólo se estudiarán pilares de edificación convencionales, es decir, pilares de hasta 3 metros de altura.
- La metodología sólo admitirá la comparación de pilares de hormigón armado.
- La metodología contemplará la utilización tanto de hormigón compactado mediante técnicas convencionales, como hormigón autocompactante para la ejecución de los pilares.
- Las secciones de los pilares podrá ser rectangular o circular.
- La metodología permitirá estudiar pilares ejecutados con hormigones de cualquier resistencia característica, es decir, tanto hormigones convencionales como hormigones de alta resistencia.

3.2.2 Criterios de evaluación

El objetivo de la metodología a desarrollar es sintetizar y objetivizar la toma de decisión para así facilitar la elección de la mejor alternativa. Para ello se utilizarán distintos métodos basados en aplicaciones jerárquicas para poder estimar y valorar distintos atributos y así obtener una valoración para cada alternativa de pilar.

La toma de decisión implica elegir entre las distintas alternativas. Esta elección va asociada a unos objetivos que el decisor desea alcanzar, es decir, la decisión está relacionada con las pautas del proyecto, las preferencias y los gustos que fija el decisor. Por lo tanto existen unas condiciones de contorno y circunstancias que inciden en la decisión a tomar. A eso lo denominamos requerimientos.

3.2.2.1 *Requerimientos*

Los requerimientos son de carácter general y permiten asignar a cada proyecto puntos de vista más específicos de acuerdo a las características y necesidades de éste. Como se explica en la introducción, la metodología que se pretende desarrollar para el análisis de los pilares se basa en una comparación o discriminación entre las distintas alternativas en base a criterios de sostenibilidad. Es decir, se considera la mejor opción la alternativa más sostenible.

Como se ha explicado en el estado del conocimiento, los requerimientos adoptados internacionalmente bajo una perspectiva sostenible, que fueron aprobados en la agenda 21 (Río de Janeiro, 1982) son el requerimiento medioambiental, el social y el económico. Estos tres ejes formarán la base del método jerárquico que se desarrollará, y por lo tanto serán los requerimientos de la metodología.

3.2.3 **Diferencias con otras herramientas**

En la actualidad existen una gran variedad de herramientas generadas en base a distintos métodos de toma de decisión. Estas herramientas pretenden crear mecanismos comunes de evaluación para el diseño y evaluar construcciones desde un punto de vista sostenible. Algunas de estas herramientas son: Building for Environmental and Economic Sustainable (BEES), Green Building Challenge (GB Tool), Leadership in Energy Environmental Design (LEED), etc.

Todas ellas son metodologías basadas en el análisis de sostenibilidad. Algunas realizan el estudio bajo un punto de vista casi exclusivamente medioambiental y otros incorporan los dos pilares básicos de la sostenibilidad: el económico y el social.

Estos ejemplos nombrados anteriormente permiten el análisis de todo un proyecto y evaluarlo mediante criterios de sostenibilidad.

Esta tesina considera que en determinados casos un análisis global de toda la edificación no consigue discriminar bien problemas o casos más locales como pueden ser los pilares. Por ello, se ha planteado el análisis local de la estructura focalizando únicamente los pilares y someterlos a una evaluación de sostenibilidad para encontrar las mejores soluciones.

3.3 MODELO

3.3.1 Introducción

El siguiente apartado presenta el desarrollo del modelo de discriminación de pilares mediante los tres requerimientos de sostenibilidad presentados anteriormente que ayudan a la estructuración del problema facilitando la toma de decisión. A continuación se presentarán todos los aspectos que se han tenido en cuenta y toda la estructuración realizada para la creación del modelo, sin entrar en ningún momento en la cuantificación ni evaluación de ninguna alternativa.

En este apartado se mostrará como se ha estructurado el modelo para facilitar la evaluación de cada alternativa de pilar y así realizar de forma más sencilla la toma de decisión. Esta estructura está basada en un modelo de jerarquización mediante un árbol de valores. Este árbol está formado por tres niveles jerárquicos distintos denominados: requerimientos, criterios e indicadores.

Los requerimientos forman el primer nivel del árbol de valores. Éstos disponen de un carácter general y permiten describir el proyecto y estructurarlo desde distintos enfoques que interesen al decisor para el estudio en cuestión. Al desarrollar un análisis de sostenibilidad los ejes que conforman los requerimientos de esta metodología son: el eje medioambiental, el eje social y el económico.

Cada uno de estos tres ejes se puede desarrollar a su vez en niveles más específicos. Estos niveles reciben el nombre de criterios e indicadores. Los indicadores son el último nivel de la estructura del modelo. Éstos tienen un carácter cuantitativo y medible.

El nivel intermedio denominado “criterios” tiene la función de agrupar los distintos indicadores que dispone el modelo. Estos criterios tienen un carácter más cualitativo y expresan una forma de agrupación. Los criterios pues agrupan a los indicadores y están agrupados a su vez por sus respectivos requerimientos.

En la Figura 2.1 se puede observar la estructura descrita anteriormente. A cada requerimiento se le asignan n criterios y a su vez a cada criterio se le asignan k indicadores.

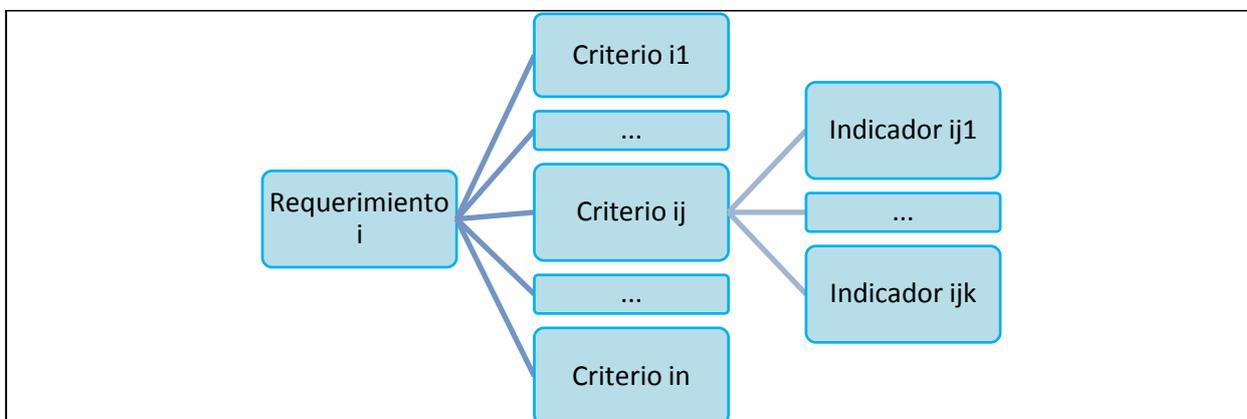


Fig. 3.1 Esquema del árbol de valores

Para que la metodología sea válida la selección de los distintos niveles debe ser coherente y cuidadosa. Se deben relacionar los requerimientos y los criterios de forma que se describa y caractericen con coherencia los pilares que se quieren evaluar. Una buena elección de los indicadores y una buena descripción de las alternativas tendrán como resultado la obtención de unos resultados coherentes y correctos. En el momento de elegir los distintos niveles se debe tener en cuenta no añadir una cantidad elevada de éstos. Cuantos más niveles se añadan se generará un mayor esfuerzo en la evaluación sin añadir mayor precisión. En esta tesina se utilizarán solamente los tres niveles descritos anteriormente: requerimientos, criterios e indicadores.

De forma más detallada, cada nivel requiere de otras recomendaciones específicas a sus características. A continuación se detalla el desarrollo del árbol de valores que forma la estructura de la herramienta y como se ha organizado cada uno de los niveles del árbol.

3.3.2 Desarrollo del árbol de valores

Como se ha presentado anteriormente, la herramienta que se desarrolla en esta tesina se estructura en un árbol compuesto por tres niveles: requerimientos, criterios e indicadores. Éstos ayudan al análisis de cada una de las alternativas y a su discriminación. El objetivo es dar una visión global del problema utilizando una jerarquización para realizar una mejor valoración de cada alternativa.

A continuación se describe cada uno de los distintos niveles del árbol de valores que se ha desarrollado:

3.3.2.1 *Requerimientos*

Como se ha indicado anteriormente los requerimientos han sido elegidos con el fin de obtener un análisis de sostenibilidad de las diferentes opciones de pilares. Los tres ejes de la sostenibilidad definidos en la agenda 21 (Río de Janeiro, 1982) son el medioambiental, el social y el eje económico. Por lo tanto, estos tres ejes son los requerimientos que forman el primer nivel del árbol de valores.

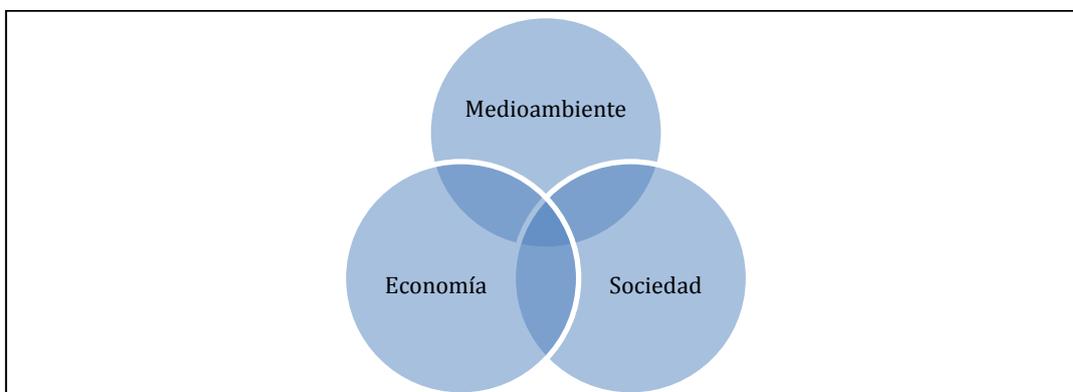


Fig. 3.2 Requerimientos que definen la sostenibilidad.

A continuación se describen cada uno de los requerimientos:

- Requerimiento medioambiental

Este requerimiento pretende evaluar los efectos que comporta la ejecución de cada una de las alternativas sobre el medioambiente. Para ello se estudian todos esos procesos que comportan una modificación del entorno natural, como pueden ser: el consumo de recursos, las emisiones de gases y elementos contaminantes, la generación de residuos contaminantes, etc.

- Requerimiento social

Este requerimiento tiene por objetivo analizar las consecuencias que generan cada una de las diferentes alternativas sobre la sociedad y las consecuencias de la decisión sobre ella. Algunos aspectos donde puede influir la ejecución de pilares en la sociedad es: generación de empleo, molestias sobre los vecinos o personas relacionadas con la obra, desarrollo comercial asociado, aspectos de seguridad y salud para los operarios, etc.

- Requerimiento económico

Este requerimiento analiza las alternativas desde un punto de vista monetario sin tener en cuenta ninguna otra consecuencia. Es decir, describe los costes y beneficios económicos generados por cada solución de pilar, los costes de mantenimiento, los beneficios o pérdidas que puede generar un tipo de solución respecto otra, etc.

Es importante señalar que estos requerimientos tienen un carácter únicamente descriptivo y su función es agrupar los diferentes indicadores en su debida categoría. Los ejemplos que se han utilizado en la descripción de cada uno de los requerimientos sirven únicamente para generar una idea más clara y comprensible de cada uno de ellos. La elección de los indicadores para evaluar cada una de los aspectos se decidirá más adelante y se discutirá si son discriminatorios y útiles para el modelo.

3.3.2.2 Criterios

El segundo nivel del árbol de valores está formado por los criterios. Éstos no son medibles y únicamente tienen la función de agrupar los aspectos que sí serán medibles. Cada uno de los criterios está agrupado según las características del requerimiento al cual pertenecen.

Los criterios que se han considerado, clasificados según sus correspondientes requerimientos, son los siguientes:

Según los requerimientos medioambientales:

- Emisiones

Este criterio describe las emisiones y residuos procedentes de la ejecución de los pilares que son perjudiciales para el medioambiente. Se tienen en cuenta tanto las emisiones producidas durante la obtención de los materiales, como las producidas en el transporte de materiales, como en la ejecución de pilares, etc.

- Consumo de recursos naturales

Este criterio tiene por objetivo agrupar todos los indicadores que cuantificarán el consumo de materias primas necesarias para la construcción del pilar. Estos consumos tienen un efecto relevante para el medioambiente. Sólo recordar que únicamente la edificación consume el 25% de las extracciones de materias primas de la litosfera (World Watch Insitute).

Según requerimientos sociales

- Efectos para el productor:

Este criterio agrupa todos los efectos sociales que influyen únicamente y directamente al productor-operario. Por lo tanto tendrá en cuenta las influencias de la producción de los pilares encima de la empresa, sobre la seguridad y salud de los trabajadores, etc. Por lo tanto los indicadores que expliquen la influencia de la obra sobre la gente relacionada directamente con ella, se encontrarán agrupados en este criterio.

- Efectos a terceros:

Este criterio agrupa todos los indicadores que describen y cuantifican la influencia de la obra sobre las personas que están relacionadas con ella, pero se encuentran fuera, en el entorno. Es decir, describe las consecuencias de la obra sobre las personas ajenas a la misma y que realizan alguna actividad a su alrededor.

Según requerimientos económicos

- Costes de construcción:

Este criterio agrupa todos los costes directos que genera la ejecución de los pilares. Estos costes pueden ser: mano de obra, materiales, etc. Al mismo tiempo también agrupará esos indicadores que cuantifiquen las pérdidas económicas que puedan aparecer a lo largo del proceso de construcción (reparaciones, modificaciones, no conformidades, etc.) y que no forman parte del coste inicial del producto final.

- Rendimiento:

Este criterio pretende agrupar los indicadores que cuantifican los costes/beneficios que generan cada una de las alternativas independientemente del precio o coste inicial del producto. Distintas formas de resolver el mismo problema puede generar que los costes a lo largo del tiempo varíen. Incluso, una solución puede aportar beneficios respecto a otra siendo igual el coste del producto a ejecutar.

3.3.2.3 Indicadores

Los indicadores constituyen la base de medición del árbol de valores. A diferencia de los requerimientos y los criterios, los indicadores son variables medibles mediante los cuales se cuantifica cada una de las alternativas.

Se pueden encontrar variables de dos tipos: variables cuantitativas y variables cualitativas. Estas últimas se tratan para convertirlas en cuantitativas y poderlas evaluar.

La evaluación de cada uno de los indicadores se realiza con su correspondiente función de valor. Esta sirve para modificar las unidades de cada uno de los indicadores y transformarlas a una misma escala, es decir, normalizar las distintas variables y cuantificarlas entre un valor de 0 a 1.

La elección de estos indicadores es una de las partes más delicadas de ésta tesina, debido a que éstos son los que van a describir cada una de las alternativas. Es importante pues, realizar una buena elección de los indicadores ya que de ésta elección va a depender el resultado final. También es importante que los indicadores sean coherentes, que discriminen bien entre alternativas y que haya los suficientes. De no ser así, un exceso de indicadores, añadiría trabajo, tiempo y diluiría el resultado de los indicadores que son realmente importantes.

Debido a la complejidad de estos indicadores, se dedica el siguiente capítulo a la descripción de cada uno de ellos así como su función de valor.

3.3.3 Árbol de valores

A continuación se presenta la estructuración final de la herramienta desarrollada. En la Figura 2.3 y en vertical, se observan los tres niveles que se han descrito anteriormente: los requerimientos, los criterios y los indicadores.

A la derecha, en el último nivel se presentan los indicadores que han sido escogidos para el modelo. Debido a su complejidad e importancia, serán descritos detalladamente en el siguiente capítulo.

ÁRBOL DE VALORES		
REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
MEDIOAMBIENTAL	EMISIONES	Emisiones de CO ₂
	CONSUMO DE RECURSOS NATURALES	Consumo de hormigón
		Consumo de Acero
SOCIAL	EFECTOS PARA EL PRODUCTOR	Molestias para el productor
		Seguridad del operario
	EFECTOS A TERCEROS	Molestias al entorno
ECONÓMICO	COSTES DE CONSTRUCCIÓN	Coste de ejecución
		Costes de no conformidades
	RENDIMIENTO	Durabilidad
		Habitabilidad

Fig. 3.3 Árbol de valores

3.4 METODOLOGÍA

En el presente apartado se presenta la metodología que se seguirá en el modelo que se ha desarrollado. El principal objetivo es evaluar las alternativas y alcanzar una cuantificación de éstas para escoger cuál de ellas es la mejor opción a ejecutar. Una vez cuantificadas las alternativas, se facilita la selección de la mejor y por lo tanto se facilita la toma de decisión. Dicha evaluación se inicia con la cuantificación de cada uno de los indicadores hasta llegar a valorar los objetivos que se han especificado en los requerimientos. Para dicha evaluación se seguirán 5 etapas:

1. Se deben ponderar los distintos niveles del árbol de valores para definir la importancia de cada uno de los elementos respecto al resto.
2. Se requiere la construcción de la función de valor para cada uno de los indicadores para unificar las escalas de cada indicador. Se normalizan los indicadores con una escala de 0 a 1.
3. Cálculo del valor de cada una de las alternativas.
4. Cálculo y selección de la alternativa óptima.
5. Análisis de sensibilidad de la toma de decisión para extraer conclusiones del comportamiento de las variables y de la validez del método.

Estas 5 etapas forman la metodología para la toma de decisión. En lo que continúa de tesina se desarrolla cada una de las etapas nombradas. Este desarrollo se presenta de la forma siguiente:

1. En el Subapartado 3.4.1 se explica la ponderación realizada para cada uno de los distintos niveles del árbol de valores.
2. En el Capítulo 4 se realiza la descripción de cada uno de los indicadores elegidos así como la función de valor de cada uno de ellos.
3. En el Capítulo 5 se realiza la valoración de cada una de las alternativas mediante la herramienta desarrollada. De los resultados extraídos se realiza una valoración de sensibilidad de las distintas variables.
4. En el Capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos en el capítulo anterior y se extraen las conclusiones del método así como las de la tesina. Mediante los resultados obtenidos será posible, si la metodología es coherente, concluir cual es la mejor opción de pilar y elegir qué decisión es la más correcta según los criterios establecidos.

3.4.1 Ponderación de requerimientos, criterios e indicadores

Para la toma de decisión procedemos a comparar cada una de las alternativas, en este caso bajo criterios de sostenibilidad. Comparar alternativas supone cuantificar diferentes parámetros para así dar una preferencia a una u otra opción. En la toma de la decisión un indicador, criterio o requerimiento no tiene porque tener la misma importancia que otro de su mismo nivel, y es la persona que está realizando el análisis quien da preferencia a

uno u otros aspectos. Para cuantificar las preferencias del decisor se utiliza la asignación de pesos en cada nivel de jerarquía del árbol de valores.

La asignación de pesos a cada nivel del árbol se puede realizar de forma directa o se puede hacer uso de distintos métodos existentes que han sido nombrados en el Capítulo 2. Algunos de estos métodos son: el método por matriz de dominación, el Minimal Pirwase Comparison (MIPAC), las matrices de escala ratio y el método de la jerarquía de objetivos.

Para el árbol de valores que se ha presentado anteriormente, la ponderación de los distintos niveles se ha realizado mediante el método de asignación directa. Para ello, se organizó un seminario con distintas personas, representativas de los distintos agentes implicados en el sector de la edificación.

3.4.1.1 Seminario

El miércoles 6 de Octubre del 2010 se celebró en el Campus Nord de la UPC un seminario para presentar a un grupo de personas el método que, en esos momentos, se estaba desarrollando. El objetivo del seminario era que las personas invitadas, profesionales experimentados provenientes de distintos perfiles de la construcción, ofrecieran su opinión al respecto del trabajo que se estaba realizando y aportaran su experiencia para realizar la ponderación del árbol de valores.

Participantes invitados

Los participantes del seminario fueron:

- Javier Pablo Ainchil Lavin, Director Técnico de FCC Construcción.
- Carlos Fernández Lillo, Construction Design Manager en Ferrovial.
- David Garcia Carrera, Gerente de BIS Arquitectes.
- Domènec Masó, Director de Calidad en PROMSA.
- Guillermo Sánchez Álvarez, Responsable de Especificaciones del grupo BASF
- Carles Cots, Ingeniero en VSL.

Ponentes

- Antonio Aguado de Cea, Catedrático de la Universitat Politècnica de Catalunya, tutor de la presente Tesina.
- Pere Duran Bertran, estudiante de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la escuela de Caminos de Barcelona, autor de la presente Tesina.

Primera parte del seminario

El seminario empezó con un pequeño ejemplo donde se mostraba, mediante distintas figuras geométricas de diferentes tamaños, como el simple criterio visual de los participantes permitía realizar una comparación de tamaños entre elementos con un error mínimo.

A continuación se procedió a presentar a los participantes del seminario por parte de los ponentes, la herramienta que en ese momento se estaba desarrollando para la discriminación de pilares bajo criterios de sostenibilidad. Se les mostró el árbol de valores que en ese momento había estado desarrollado y se procedió a realizar una descripción de cada uno de los niveles del árbol y de forma más intensa se analizaron los distintos indicadores.

Una vez realizada la ponencia, los participantes realizaron su propio análisis y aportaron sus respectivas opiniones. Como conclusión de las diferentes valoraciones se obtuvo:

- Pequeñas modificaciones de organización de criterios e indicadores que quedan reflejadas en el árbol de valores que se ha presentado anteriormente.
- Modificaciones en la nomenclatura de algún criterio e indicador sin ver modificados sus objetivos de estudio y análisis.
- Aportación del indicador Costes de no conformidad. Esta aportación fue fruto de la experiencia de los participantes, que mostraron la importancia y existencia, en la construcción in situ de pilares, de equipos encargados de reparar los elementos estructurales y los costes que éstos generan fruto de la obtención de un producto con una calidad no deseada.

Segunda parte del seminario

Una vez el árbol de valores fue totalmente analizado y discutido hasta llegar a la estructura que se muestra en la Figura 3.3, se procedió a valorar la importancia de cada uno de los componentes de cada nivel del árbol.

El objetivo era conseguir la ponderación del árbol de valores mediante la experiencia y opinión de los distintos participantes. Por lo tanto, el método escogido para la ponderación del árbol de valores ha sido el método de asignación directa.

El método de asignación directa es el método más sencillo debido a que se asignan los pesos a los distintos criterios considerados en la toma de decisión de forma directa, es decir, mentalmente y sin ningún cálculo previo, se asigna el porcentaje de cada criterio de forma que la suma de todos los porcentajes sea 100%. Esta herramienta se caracteriza por su gran sencillez y es eficaz debido a que el número de aspectos no es muy elevado.

La ponderación fue realizada por parte de los participantes del seminario. El trabajo de los ponentes se redujo a conducir y moderar la discusión del trabajo que se estaba realizando.

El objetivo de este modo de trabajo era que las ponderaciones finales fueran extraídas sin intervención alguna y fueran fruto de un consenso de la experiencia y opiniones de los distintos profesionales presentes en el seminario. Estas personas, todas ellas provenientes de distintos sectores y con distintos intereses, se enfrentaron a cada uno de los requerimientos, criterios e indicadores desde sus distintos puntos de vista. La ponderación se realizó de izquierda a derecha, es decir, se evaluaron primero los requerimientos y finalmente los indicadores hasta obtener el resultado definitivo.

Gracias a esta forma de trabajo se consiguió un árbol de valores final, producto del consenso de los distintos agentes que participan en la ejecución de pilares. Por lo tanto, una herramienta que equilibra los intereses de cada agente sin la influencia de intereses externos.

Conclusiones del seminario

Al finalizar el seminario, una vez realizadas las modificaciones en el árbol y las distintas valoraciones, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- El método desarrollado está pensado para edificación estándar de viviendas u/o oficinas sin ninguna complejidad añadida por lo que refiere a pilares.
- La toma de decisión, debido al consenso y equilibrio de intereses, está pensada en gran medida para la Administración Pública, velador de los intereses de los distintos agentes y principal interesado en la obtención de la solución más sostenible, es decir, la más equilibrada. Como se ha definido en el Capítulo 2, Estado del conocimiento, la Administración Pública como agente implicado en el desarrollo sostenible:

“es la encargada de establecer las bases del proceso aportando los criterios básicos a aplicar mediante legislación reguladora a todos los niveles. También tiene que asumir su responsabilidad como modelo formativo, potenciando las experiencias prácticas y los ejemplos para que puedan ser compartidos por la sociedad en general”

- Las ponderaciones pueden ser variables, según los tiempos, ámbito económico, lugar de aplicación, etc. Las valoraciones que se presentan fueron realizadas en un contexto económico de recesión en España. Un cambio significativo en el sector, puede traducirse en una rediscusión de las ponderaciones del árbol de valores.

Finalmente, en la Tabla 3.1 se muestra el resultado final del seminario, el árbol de valores con las correspondientes ponderaciones obtenidas.

REQUERIMIENTOS		CRITERIOS		INDICADORES	
MEDIOAMBIENTAL	33%	EMISIONES	67%	Emisiones CO2	100%
		CONSUMO DE RECURSOS NATURALES	33%	Consumo de Hormigón	90%
				Consumo de Acero	10%
SOCIAL	17%	MOLESTIA PARA EL PRODUCTOR	80%	Molestias para el productor	20%
				Seguridad del operario	80%
		MOLESTIAS A TERCEROS	20%	Molestias al entorno	100%
ECONÓMICO	50%	CONSTRUCCIÓN	67%	Coste de ejecución	85%
				Costes de no conformidad	15%
		RENDIMIENTO	33%	Durabilidad	60%
				Habitabilidad	40%

Tabla 3.1 Pesos de los distintos niveles del árbol de valores.

3.4.2 Función de valor

Como se ha explicado, para facilitar la comparación de las distintas alternativas de pilares, se realiza una cuantificación de cada una de ellas asignándoles un valor según se considere mejor o peor opción.

En el subapartado anterior se ha mostrado el árbol de valores que ha sido desarrollado para poder realizar la valoración de cada alternativa. La valoración se realiza mediante la cuantificación de cada indicador y, mediante las ponderaciones correspondientes, alcanzar el índice de sostenibilidad de cada uno de los pilares estudiados.

La cuantificación de cada indicador se realiza mediante sus respectivas funciones de valor. Esta función permite normalizar cada variable entre un valor de 0 a 1 que permite la obtención del índice final de cada alternativa. En esta tesina, se utiliza la herramienta MIVES para realizar esta normalización.

La herramienta MIVES propone la siguiente expresión para modelar la función de valor:

$$V_{ind} = A + B \cdot \left[1 - e^{-k_i \cdot \left(\frac{|x_{ind} - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]$$

Donde:

- A es el valor que genera la abscisa “inf”, generalmente A=0.
- $X_{mín.}$ abscisa del indicador que genera un valor igual a “A”.
- X_{ind} abscisa del indicador evaluado que genera un valor V_{ind}
- P_i factor de forma que define si la curva es cóncava, convexa, recta o con forma de “S”. Determina la pendiente de la curva en el punto de inflexión de coordenadas (C_i , K_i)
 - $P_i < 1$ para curvas cóncavas
 - $P_i > 1$ para curvas convexas o curvas en “S”
 - P_i tiende a 1 para rectas
- C_i establece, en curvas con $P_i > 1$, el valor de la abscisa en el que se produce el punto de inflexión.
- K_i define el valor de la ordenada del punto C_i .
- B es el factor para que la función se mantenga en el rango (0.00 , 1.00) y hace que siempre la mejora respuesta tenga un valor igual a 1. Viene definido por la expresión:

$$B = \frac{1}{1 - e^{-k_i \cdot \left(\frac{|x_{max} - x_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}}}$$

- X_{max} es la abscisa del indicador que genera un valor igual a 1.

Para cada indicador se definirá su función de valor mediante la expresión expuesta anteriormente y así, poder realizar la cuantificación de cada uno de ellos. Así pues, en el capítulo siguiente son presentados detalladamente cada uno de los indicadores descritos en el árbol de valores y su función de valor correspondiente.

CAPÍTULO 4

INDICADORES Y FUNCIONES DE VALOR

4.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha presentado el modelo desarrollado en la presente tesina para la comparación de pilares de edificación. El árbol de valores que se ha mostrado, facilita la visualización de todos los aspectos a analizar y permite la comparación entre alternativas. Todos los pilares que se quieren analizar cumplen con la normativa vigente y están sometidos a las mismas solicitaciones y condiciones de contorno. Por lo tanto, bajo un mismo marco, la comparación muestra los puntos fuertes y débiles de cada uno de los posibles pilares.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el análisis se desarrolla bajo criterios de sostenibilidad. Para ello se ha dividido el árbol de valores en tres ramificaciones principales: la medioambiental, la social y la económica. De estos tres requerimientos surgen los distintos criterios que se pueden observar en el árbol de valores (Figura 3.3). El objetivo de las distintas ramificaciones es poder desglosar las diferentes soluciones de forma que se facilite la comparación y el análisis de cada una de ellas, estructurando cada alternativa en distintos aspectos. Al final del desglose conceptual para el análisis de los pilares, encontramos los indicadores que permiten la cuantificación de cada una de las alternativas que se analizan.

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS	INDICADORES
MEDIOAMBIENTAL	EMISIONES	Emisiones CO2
	CONSUMO DE RECURSOS NATURALES	Consumo de Hormigón
		Consumo de Acero
SOCIAL	MOLESTIA PARA EL PRODUCTOR	Molestias para el productor
		Seguridad del operario
	MOLESTIAS A TERCEROS	Molestias al entorno
ECONÓMICO	CONSTRUCCIÓN	Coste de ejecución
		Costes de no conformidad
	RENDIMIENTO	Durabilidad
		Habitabilidad

Tabla 4.1 Requerimientos, criterios e indicadores del modelo.

Una de las partes más delicadas del desarrollo del árbol de valores es la elección de los indicadores. Éstos indicadores son la base para evaluar cada uno de los pilares. Una mala elección de éstos supone un análisis impreciso, una mala discriminación y la obtención de un modelo no válido.

Debido a esta complejidad y delicadez es conveniente dedicar un capítulo entero para describir cada indicador así como también su función de valor.

En base a lo expuesto en las líneas superiores, los objetivos de este capítulo son los siguientes:

- Describir detalladamente cada indicador presente en el árbol de valores del método desarrollado.
- Presentar la función de valor de cada indicador que permite la normalización de éste en un valor entre 0 y 1. Esto permite cuantificar cada indicador y, mediante las ponderaciones correspondientes, obtener un índice de valor que oscile entre 0 y 1 para cada alternativa.

4.2 INDICADORES SELECCIONADOS

La función de los indicadores no trata de describir cuanto de buena o mala es la solución a analizar. Lo que se pretende realizar con estos indicadores es cuantificar las distintas alternativas de pilares para facilitar su comparación. Para esta función, se han escogido 10 indicadores repartidos en los distintos criterios y requerimientos descritos en el capítulo anterior.

La selección de indicadores es delicada y se debe tener cuidado con la elección de un posible indicador y tomarlo como válido o descartarlo para el modelo. Como se ha

explicado, los indicadores forman la base de la cuantificación para poder elegir la alternativa más sostenible de las posibles soluciones de pilares, una mala elección se traduciría en la obtención de un modelo erróneo.

Para la elección de los indicadores, se han seguido los criterios que se presentan a continuación:

- Los indicadores deben ser cuantificables. Esto significa que se deben poder medir bien a partir de variables o atributos.
- Los indicadores deben tener validez científica, es decir, deben estar bien fundamentados.
- Los indicadores deben ser suficientemente independientes, deben medir variables independientes.
- Los indicadores deben ser suficientemente complementarios, es decir, deben estar interrelacionados en el momento de su evaluación.
- Los indicadores deben estar definidos de forma clara, de manera que aborden todo lo que se quiere evaluar. Cuánto más precisos sean, más precisa será la herramienta en el momento de la evaluación.
- La comprensión de los indicadores por parte de cualquier persona debe ser sencilla y estar garantizada. Esto engloba a personas que hayan estado relacionadas con el desarrollo de esta tesina y a las externas a ella.
- Los indicadores deben ser representativos respecto al problema que se plantea en esta tesina.
- Los indicadores deben estar elegidos de forma que garantice la futura comparativa de los datos. Los indicadores y la información necesaria para su cálculo deben ser válidos al paso del tiempo.
- La información debe ser lo más objetiva posible sin estar sometida a la manipulación e intereses de terceros.
- La información y datos para el cálculo de los indicadores deben provenir de fuentes consistentes y contrastadas.
- La obtención de la información necesaria para la utilización del modelo desarrollado no debe implicar un desembolso, ni económico ni de medios, considerable.

A partir de estos criterios han sido elegidos los 10 indicadores clasificados en los 3 criterios de sostenibilidad: medioambiente, social y económico. A continuación se realiza la explicación de cada uno de los indicadores.

4.2.1 Requerimiento medioambiental

Debido a la creciente sensibilidad medioambiental es indispensable tratar este aspecto en el análisis de cada alternativa. Los indicadores de este requerimiento pretenden cuantificar y comparar los efectos que genera la ejecución de cada uno de los pilares sobre el medioambiente.

Los criterios a tener en cuenta son amplios. Para el problema que se está tratando en esta tesina los dos criterios considerados más importantes son: las emisiones de contaminantes generadas en los distintos procesos implicados en la ejecución de un pilar; y el consumo de recursos naturales que se producen para obtener el elemento estructural en cuestión.

Existe un gran abanico de emisiones producidas en construcción. Como se ha explicado, no es conveniente disponer de una gran cantidad de indicadores que cuantifiquen todas las emisiones. Por este motivo, a modo representativo se ha seleccionado como indicador las emisiones de CO₂ totales que se generan para la obtención de cada uno de los pilares. Estas emisiones son de las más importantes y representativas. Además, la obtención de datos necesarios para proceder al cálculo del indicador no es difícil.

El segundo y último criterio que se ha considerado es el consumo de recursos naturales. Como se ha indicado anteriormente en el estado del conocimiento, únicamente la edificación consume el 25% de las extracciones de materias primas de la litosfera. Por lo tanto, es un aspecto importante a tener en cuenta ya que las distintas secciones y resistencias de los materiales empleados en cada alternativa, supondrán un ahorro de materiales o un consumo mayor de éstos. Cabe señalar que como indica el criterio, sólo se trata de consumo de recursos naturales y no se consideran los materiales que provienen del reciclaje.

A continuación, en la Tabla 4.2 se detalla la clasificación de los criterios e indicadores que forman dicho requerimiento medioambiental.

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
MEDIOAMBIENTAL	EMISIONES	Emisiones de CO ₂
	CONSUMO DE RECURSOS NATURALES	Consumo de Hormigón
		Consumo de Acero

Tabla 4.2 Descripción del requerimiento medioambiental.

En éste requerimiento se podrían haber considerado otros criterios y otros indicadores que en esta tesina se han despreciado. Algunos de ellos, por ejemplo, son las cantidades de material reciclado usad, o el consumo total de energía asociado a la ejecución del pilar.

Las cantidades de material reciclado no se han considerado, debido a que actualmente las cantidades de hormigón reciclado que se usa para la construcción de pilares de edificación son mínimas para no decir nulas. Aún así, la utilización de material reciclado disminuiría la

cantidad de materia prima, favoreciendo al indicador de consumo de hormigón que si se contempla.

Por otro lado, el acero utilizado para las armaduras del pilar es habitual que provenga del reciclado. Actualmente debido a la globalización de mercados y a la competitividad de precios, se está incrementando el uso de aceros provenientes de países como la India, China, etc. Los aceros provenientes de muchos de estos países no provienen del reciclado y esta práctica es penalizada en el indicador de consumo de acero. Por lo tanto se desprecia considerar el consumo de materiales reciclados para no añadir un exceso de indicadores y así no diluir el resultado de esos indicadores más importantes.

Otro aspecto que no se ha considerado relevante es el consumo total de energía asociado a la ejecución del pilar debido a que las diferencias entre alternativas no son significativas. También, el consumo de energía está relacionado con las emisiones de CO₂ y éstas si discriminan bien entre soluciones. Por este motivo se considera que dicho indicador de consumo de energía es prescindible, debido a que no permitirá una discriminación adecuada entre alternativas.

A continuación se detalla y describe cada uno de los indicadores que si han sido incluidos en el requerimiento medioambiental.

4.2.1.2 Emisiones de CO₂

Distintos contaminantes son emitidos a lo largo de los procesos relacionados en la obtención final de un pilar. Uno de los materiales relacionados que produce la mayor parte de las emisiones es el hormigón.

Los contaminantes más relevantes del hormigón son: partículas, CO₂, NO y SO₂. Ninguno de ellos se debe despreciar y todos se tienen que tener en consideración y procurar la reducción de ellos. Aún así, se han elegido las emisiones de CO₂ como el indicador representativo de la emisión de contaminantes. El motivo de ésta elección es por su facilidad de cálculo y por su importancia en los efectos del cambio climático.

Objetivo

Los objetivos pretendidos con este indicador son:

- Reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera producidas durante la fabricación y puesta en obra del hormigón utilizado para la construcción de los pilares de edificación.
- Fomentar el uso de hormigones que incluyan áridos reciclados con el fin de disminuir las emisiones producidas en la extracción de recursos naturales.
- Fomentar la investigación y producción de hormigones que generen menos contaminantes y proporcionen las mismas o mejores prestaciones técnicas que los actuales.
- Concienciar a todo los agentes presentes en el sector de la construcción de su papel destacado en cualquier reducción de emisión de contaminantes y fortalecer su compromiso con el Medioambiente.

Estrategias

Para reducir las emisiones de CO₂ es necesario adoptar nuevas estrategias para la gestión de los materiales empleados en la construcción de los pilares.

El mayor responsable de las emisiones de CO₂ es el hormigón, y en éste el cemento. Por lo tanto, para disminuir las emisiones del gas contaminante, se debe potenciar el uso de cementos cuyo porcentaje de adiciones sea mayor, como por ejemplo cementos con cenizas volantes. También es recomendable usar esos cementos cuya producción utiliza materias primas o combustibles que reducen las emisiones del gas.

Para disminuir las emisiones de CO₂ también se debe potenciar:

- La utilización de aditivos para reducir las emisiones
- Promover el uso de materiales reciclados.
- Minimizar las distancias y los costes de transporte de material.
- Concienciar de la responsabilidad del sector de la construcción con su influencia en el cambio climático y el daño al medioambiente.

Forma de medición

La cuantificación de este indicador para cada una de las alternativas, se realiza mediante el cálculo de las emisiones totales de CO₂ del hormigón utilizado para la construcción del pilar.

Para conocer las emisiones del hormigón, es necesario primero de todo, conocer la dosificación de éste, es decir, las cantidades de: cemento, áridos, aditivos y agua.

A partir de cada uno de los componentes de la mezcla, se procederá a calcular las emisiones que generan durante todo el proceso de fabricación hasta la puesta en obra. Los aspectos a tener en cuenta son:

- Emisiones producidas durante la extracción y/o fabricación de los distintos materiales primarios.
- Emisiones realizadas durante los transportes del cemento, áridos y aditivos hasta la planta de producción.
- Emisiones durante la mezcla de materiales para la fabricación del hormigón.
- Emisiones de CO₂, considerando los residuos que se producen durante la fabricación del hormigón y de los materiales.
- Emisiones producidas durante el transporte del hormigón para su puesta en obra.

Con el cálculo de emisiones, se obtiene el peso de CO₂ generado por cada metro cúbico de hormigón. Como las distintas alternativas pueden tener secciones distintas, se procederá a la obtención de la cantidad de CO₂ emitido por cada una de las alternativas. Como resultado, se obtendrá las emisiones de CO₂ del hormigón de cada elemento estructural estudiado. Éste valor es el que se debe introducir en la función de valor para cuantificar el indicador.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 30 y 150 kg de CO₂ respectivamente. 30 kg de CO₂ porque es la cantidad mínima emitida por la sección más pequeña posible en edificación (25x25cm²) y 150 porque se considera que actualmente, un pilar con un hormigón óptimo y la sección requerida, no supera en ningún caso los 150 kg de CO₂, sin embargo este límite superior puede modificarse de acuerdo a las características que se consideren.

Respecto a la pendiente es una función descendiente por que a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera. La forma de la curvatura es en S porque se recompensa a esas alternativas que reducen sus emisiones y se penaliza notoriamente las que se alejan del valor de satisfacción. En la gráfica 4.1 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

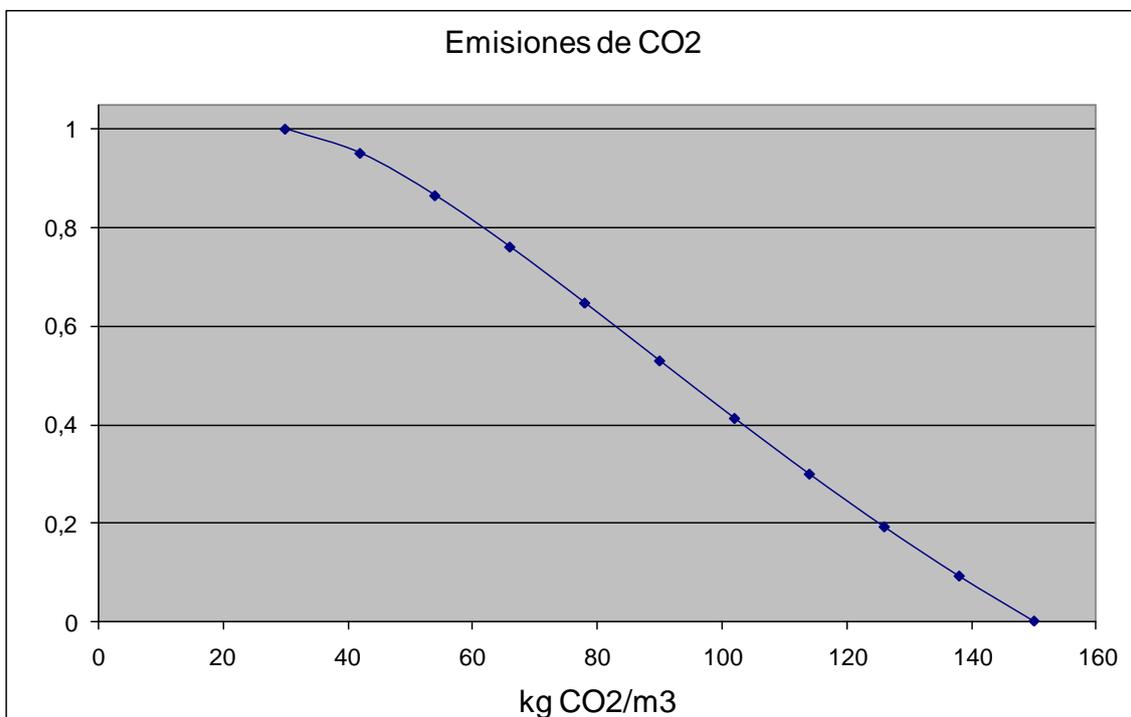


Fig. 4.1 Función de valor del indicador emisiones de CO₂.

4.2.1.3 Consumo de Hormigón

Como se ha explicado anteriormente, en el inicio del Subapartado 3.2.1, este indicador sólo tendrá en cuenta las cuantías de hormigón fabricado mediante materia primera, sin tener en cuenta el material reciclado. La presencia de material reciclado comportará una menor cantidad de materia primera en el pilar favoreciendo la valoración de la alternativa.

A continuación se presentan las características de este indicador:

Objetivo

Los objetivos que se persiguen con este indicador son:

- Reducir las extracciones de materias primas necesarias para la producción de hormigón.
- Promover el uso de materiales reciclados para la obtención del hormigón que se usará en la ejecución de pilares.

Estrategias

Como se ha indicado en el estado del conocimiento, el sector de la construcción es uno de los mayores responsables de las extracciones de materiales debido al gran consumo de ellos genera. Se calcula que en la construcción de una vivienda el consumo de material por m^2 es de 2500 Kg. Si se tiene en cuenta la generación de residuos, la cifra anterior se eleva a 7500 Kg por cada m^2 construido. En total, España generaba anualmente 38,5 millones de toneladas de residuos de la construcción [Cemex, 2006]. Se estima pues, que la contribución del hormigón a los residuos de construcción y demolición es del 53% en volumen y del 67% en peso [Wilson, A.; 1993].

Para reducir los efectos que el sector genera debido al consumo de materiales se deben promover los siguientes aspectos:

- Promover soluciones más eficientes, utilizando materiales que permitan resolver el mismo problema de solicitaciones pero con un consumo menor de material, es decir, la posibilidad de obtener secciones más pequeñas.
- Potencial la utilización de áridos reciclados como material para la obtención del hormigón empleado.

Forma de medición

Para la cuantificación del indicador, se debe proceder a calcular la cantidad de hormigón que requiere la alternativa de estudio. La cuantía de hormigón que se debe considerar, es el hormigón producido sin materiales reciclados.

Si el hormigón presente en el elemento estructural de estudio contiene material reciclado, se debe sustraer ese porcentaje de la cantidad total de hormigón.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0.18 y 0.7 m^3 de hormigón respectivamente. 0.18 m^3 porque es la cantidad necesaria para la sección más pequeña posible en edificación ($25 \times 25 \text{cm}^2$). Esta cantidad resulta de no considerar alternativas con hormigón reciclado, por lo tanto, este límite inferior puede modificarse de acuerdo a las características que se consideren en el análisis de alternativas. El límite superior considerado es 0.7 m^3 , no se estudian secciones que requieran una mayor cantidad de material.

Respecto a la pendiente, es una función descendiente por que a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera. La forma de la curvatura es cóncava porque se penaliza notoriamente que se aleje del valor de satisfacción. En la gráfica 4.2 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

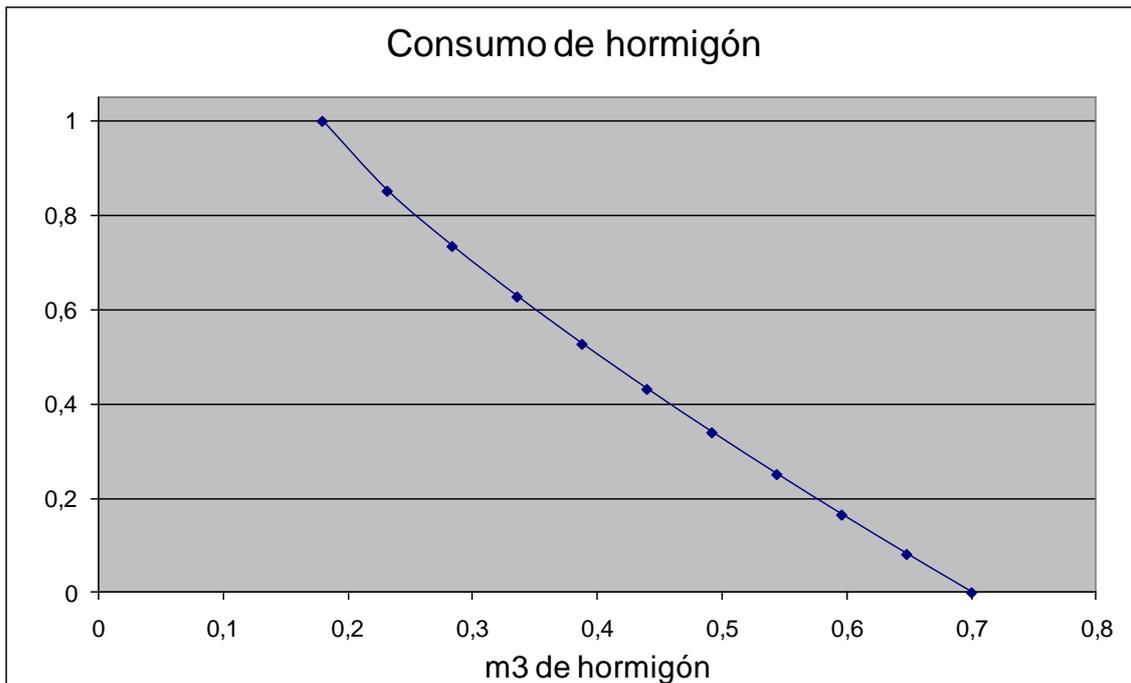


Fig. 4.2 Función de valor del indicador consumo de hormigón.

4.2.1.4 Consumo de Acero

El acero es el metal más utilizado en el mundo en sectores tan diversos como la construcción, los electrodomésticos o la automoción. El empleo de acero reciclado en su proceso de fabricación disminuye el consumo de energía en un 70% y evita la extracción y transporte de nuevas materias primas como el hierro y el carbón. Por cada tonelada de hacer usado que se recicla, se ahorra una tonelada y media de mineral de hierro y unos 500 Kg. del carbón que se emplea para hacer el coque siderúrgico, el combustible utilizado en la fabricación de este metal. El uso del agua se reduce en un 40%.

La importancia del reciclaje del acero es extremadamente elevada y las plantas siderúrgicas son cada vez más conscientes de esta situación pues no podrían continuar su ritmo de producción si no contaran con la posibilidad de aprovechar la chatarra férrica.

En 2005, según el International Iron and Steel Institute (IISI), se registró un aumento aproximadamente de un 6% del consumo mundial de acero y actualmente supera los mil millones de toneladas. El consumo aparente, excluyendo China, experimentó una caída del 1% debido a la disminución observada en Europa y Norteamérica. China, por lo contrario, registró un incremento del consumo aparente del 23% y representa en la actualidad prácticamente un 32% de la demanda mundial de acero.

En 2005, se registro un incremento del 5.9% en la producción mundial de acero respecto el 2004. El aumento registrado se debió fundamentalmente a las empresas siderúrgicas chinas, cuya producción se incrementó en un 24.6%, situándose en 349.4 millones de toneladas, representando un 31% de la producción mundial. Asimismo, la India registró

un aumento del 16.7% en su producción, convirtiendo a Asia en el actual productor de la mitad del acero mundial.

Una de las problemáticas que se han registrado debido a las economías de escala ha sido justamente la importación del acero producido en Asia. Este acero, la mayor parte de él proveniente de materias primas y no del reciclado, es ofrecido en España a un coste menor. Por consiguiente, se ha observado el aumento de la demanda, así como la oferta, de estos aceros generando mayores beneficios económicos al productor.

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Reducir las extracciones de materia prima para la obtención de acero para las armaduras.
- Promover el consumo de acero reciclado.
- Promover la obtención de alternativas más eficientes que requieran de un consumo de acero menor.

Forma de medición

Para cuantificar este indicador, se deberá calcular la cantidad de armadura longitudinal y transversal que contiene el pilar.

En la función, se indicará la cantidad de armadura en Kg. Mediante esta unidad se obtendrá el valor del indicador para la alternativa correspondiente, siempre y cuando el acero provenga del reciclado. Si el acero proviene de materias primas y no del reciclado, entonces el valor extraído de la función de valor debe ser multiplicado por 0.5.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 20 Kg y 50 Kg de acero respectivamente. 20 Kg porque es aproximadamente la cantidad mínima necesaria para la sección más pequeña posible en edificación (25x25cm²). El límite superior considerado es 50 Kg porque se considera que la diferencia máxima entre el valor óptimo no debe exceder los 50 Kg, sin embargo este límite superior puede modificarse de acuerdo a las características o a las alternativas que se consideren.

Respecto a la pendiente, es una función descendiente por que a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera. La forma de la curvatura es convexa porque se recompensa notoriamente el mayor ahorro de acero. En la gráfica 4.3 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

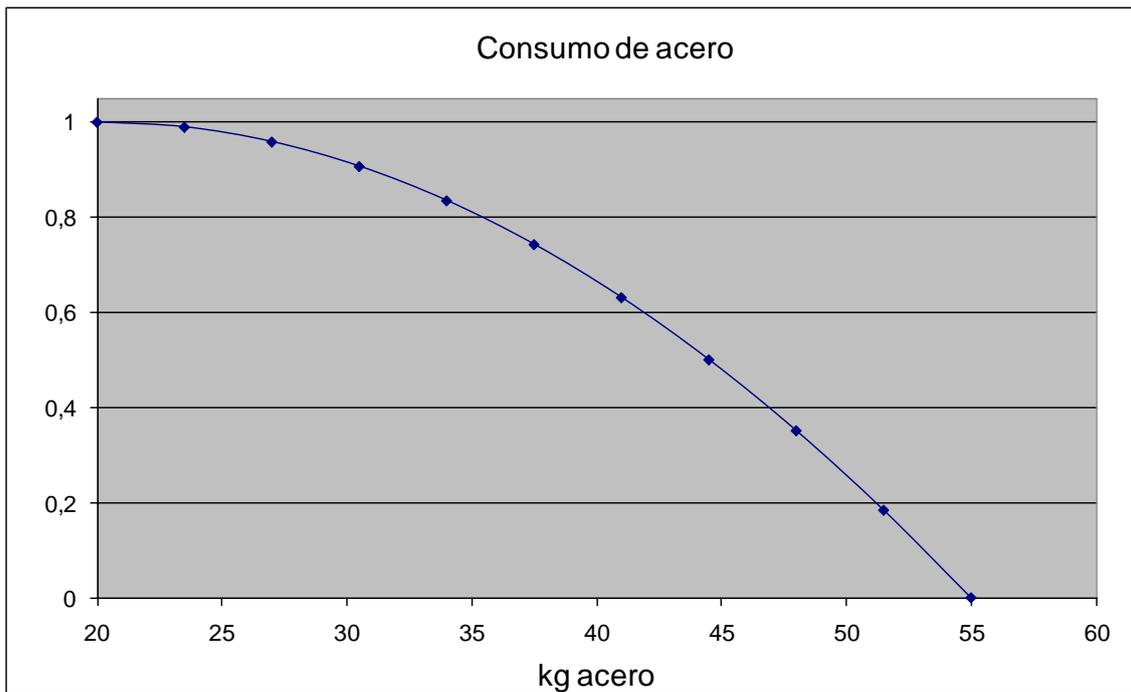


Fig. 4.3 Función de valor del indicador consumo de acero.

4.2.2 Requerimiento social

Como se ha explicado en el Capítulo 3, este requerimiento analiza la repercusión e integración de cada alternativa dentro de la sociedad que rodea o se relaciona con el proceso de construcción de cada uno de los pilares que se estudian.

En la Tabla 4.3 se puede observar la clasificación del requerimiento en dos criterios. Primeramente se evaluará la influencia de la construcción de los pilares en las personas que están directamente relacionadas en la construcción y ejecución del pilar. En otro grupo, se recoge el indicador que cuantifica la influencia de la ejecución de los pilares en personas ajenas a la obra, pero que sus actividades se ven afectadas por este proceso.

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
SOCIAL	EFECTOS PRODUCTOR	Molestias productor
		Seguridad operario
	EFECTOS A TERCEROS	Molestias al entorno

Tabla 4.3 Criterios e indicadores el requerimiento social.

A continuación se detalla y describe cada uno de los indicadores incluidos en el requerimiento social del modelo.

4.2.2.2 *Molestias para el productor*

Este indicador pretende cuantificar las consecuencias de la ejecución de los pilares sobre la salud de los trabajadores que se encargan del proceso.

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Reducir la intensidad sonora dentro de la obra que producen molestias e incluso daños a los trabajadores, en especial las producidas durante la compactación del hormigón, las más relevantes en la ejecución de pilares.

Estrategias

Los trabajadores del sector de la construcción, están expuestos a la acción de numerosos agentes ambientales que implican la presencia de riesgos, aparte de distintas situaciones y acciones que aumentan la probabilidad de accidente.

Desde el punto de vista técnico preventivo, se habla de enfermedad derivada del trabajo entendiéndose como tal, aquel deterioro lento y paulatino de la salud del trabajador, producido por una exposición crónica a situaciones adversas, sean producidas por el ambiente en que se desarrolla el trabajo o por la forma en que éste está organizado. Los efectos dañinos para la salud pueden variar, desde simples irritaciones conjuntivas hasta enfermedades crónicas.

Los trabajadores presentes en la construcción de pilares están expuestos a los siguientes agentes ambientales y riesgos:

- Ambientes pulvígenos: pueden producir neumoconiosis y bronquitis crónica.
- Contactos de la piel con el hormigón: riesgo de alergias cutáneas y dermatitis.
- Exposición al ruido y vibraciones (maquinaria y vibradores): se puede producir hipoacusia o sordera Profesional y enfermedad del “dedo muerto”.
- Condiciones climáticas extremas (trabajos a la intemperie): riesgo de estrés térmico (golpe de calor, insolación, deshidratación, enfriamiento).

Los cuatro puntos describen los riesgos de salud a los cuales se enfrentan los operarios destinados a la ejecución de pilares. De estos cuatro, el polvo, las condiciones climáticas y el contacto de la piel con el hormigón se desprecian para la valoración del indicador, debido a que no hay claras diferencias entre alternativas y no permiten una buena discriminación.

Para la cuantificación del indicador, los dos agentes más importantes son: el ruido y las vibraciones a las que está expuesto el trabajador. El primero puede generar hipoacusia y una larga exposición al segundo agente, las vibraciones, puede generar la enfermedad denominada dedo muerto.

Para esta tesina, como una primera aproximación, se toma el ruido como el agente más representativo de las molestias a las que está expuesto el productor, por ser fácilmente

medible y por discriminar bien entre las alternativas posibles. Por lo tanto esta variable será la que se medirá para la cuantificación del indicador.

Exposición al ruido

Una persona sometida a una larga exposición al ruido, está bajo el peligro de desarrollar hipoacusia. Se define hipoacusia, como la disminución del nivel de audición de una persona por debajo de lo normal. Esta disfunción puede ser reversible o permanente, cuando no se puede devolver la capacidad auditiva mediante tratamiento. La hipoacusia es producida principalmente por el agente causante del ruido, lo que quiere decir que éste es un sonido desarmónico e indeseado, que va provocando molestia en alta intensidad. El operario al estar expuesto a alta intensidad auditiva, sufre alteraciones transitorias que al ser éstas reiterativas, el deterioro se va produciendo lentamente y va provocando daño a la salud nerviosa hasta llegar a una hipoacusia.

Los factores influyentes en la lesión auditiva se considera que son:

- Intensidad del ruido: El límite para evitar la hipoacusia es de 80 dB(A) para una exposición de 40 h. semanales, a un ruido constante.
- Frecuencia del ruido: La banda de 4000 Hz es el primer signo en la mayoría de casos.
- Tiempo de exposición: La lesión auditiva inducida por ruido sigue una función exponencial.

Según el Real Decreto 286/2006 del 10 de Marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido:

Artículo 5. *Valores límite de exposición y valores de exposición que dan lugar a una acción.*

A los efectos de este real decreto, los valores límite de exposición y los valores de exposición que dan lugar a una acción, referidos a los niveles de exposición diaria y a los niveles de pico, se fijan en:

- *Valores límite de exposición: $L_{Aeq,d} = 87$ dB(A) y $L_{pico} = 140$ dB (C), respectivamente.*
- *Valores superiores de exposición que dan lugar a una acción: $L_{Aeq,d} = 85$ dB(A) y $L_{pico} = 137$ dB (C), respectivamente.*
- *Valores inferiores de exposición que dan lugar a una acción: $L_{Aeq,d} = 80$ dB(A) y $L_{pico} = 135$ dB (C), respectivamente.*

En la Tabla 4.4 se muestra el tiempo límite que la persona debería estar expuesta a diferentes tipos de intensidad de sonidos para que así no afecte o dañe la salud auditiva.

Nivel Sonoro dB (A)	Tiempo de exposición por jornada (horas)
85	8
90	4
95	2
100	1
105	0.5
110	0.25
115	0.13

Tabla 4.4 Niveles sonoros y tiempos de exposición límite para un operario.

Durante la ejecución de los pilares la mayor intensidad de ruido se produce al vibrar el hormigón. En construcción la compactación de éste material se puede realizar mediante:

- Barras de acero, donde el ruido producido por maquinaria es nulo.
- Vibradores eléctricos.
- Vibradores neumáticos.

El ruido generado por un vibrador neumático puede alcanzar, incluso en vacío, del orden de 105 dB(A), mientras que en el caso de los vibradores eléctricos, el nivel de ruido, se sitúa por debajo de los 80 dB(A). No obstante, debe tenerse en cuenta que el encofrado eleva el nivel de ruido, sobre todo en el inicio del llenado del hormigón, pudiendo alcanzar fácilmente los 120 dB(A) en el caso de los vibradores neumáticos. Se calcula que los vibradores eléctricos, en esta situación, el nivel de partida es de al menos 20 dB(A) inferior a los neumáticos.

En la Tabla 4.5 se muestra las emisiones de ruido orientativas para cada tipología de compactación:

COMPACTACIÓN	NIVEL SONORO (dB)
Compactación con barra (manual)	0
Vibradores eléctricos	60 - 100
Vibradores neumáticos	90 - 120

Tabla 4.5 Niveles sonoros de las distintas formas de compactación de pilares.

Forma de medición

Para la cuantificación de este indicador, se evaluará la exposición al ruido a la que está expuesta el operario durante la ejecución de los pilares. El ruido en una obra es prácticamente inevitable, pero éste se ve incrementado durante la compactación del hormigón en el caso de ejecución de pilares. Por lo tanto, la medición del ruido será en el momento de la compactación del hormigón, tomando como valor representativo el ruido producido por el vibrador.

Si se desconoce el ruido producido por la maquinaria de compactación del hormigón, el cálculo de las emisiones de ruido a las que está expuesto el trabajador se realizarán utilizando el Anejo II: Medición del ruido, del Real Decreto 286/2006 sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

- Las mediciones deberán realizarse, siempre que sea posible, en ausencia del trabajador afectado, colocando el micrófono a la altura donde se encontraría su oído. Si la presencia del trabajador es necesaria, el micrófono se colocará, preferentemente, frente a su oído, a unos 10 centímetros de distancia; cuando el micrófono tenga que situarse muy cerca del cuerpo deberán efectuarse los ajustes adecuados para que el resultado de la medición sea equivalente al que se obtendría si se realizara en un campo sonoro no perturbado.
- Número y duración de las mediciones: El número, la duración y el momento de realización de las mediciones tendrán que elegirse teniendo en cuenta que el objetivo básico de éstas, es el de posibilitar la toma de decisión sobre el tipo de actuación preventiva que deberá emprenderse en virtud de lo dispuesto en el presente real decreto. Por ello, cuando uno de los límites o niveles establecidos en el mismo se sitúe dentro del intervalo de incertidumbre del resultado de la medición podrá optarse: a) por suponer que se supera dicho límite o nivel, o b) por incrementar (según el instrumental utilizado) el número de las mediciones (tratando estadísticamente los correspondientes resultados) y/o su duración (llegando, en el límite, a que el tiempo de medición coincida con el de exposición), hasta conseguir la necesaria reducción del intervalo de incertidumbre correspondiente.

En el caso de la comparación con los valores límites de exposición, dicho intervalo de incertidumbre deberá estimarse teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la atenuación de los protectores auditivos.

- Las incertidumbres de medición a las que se hace referencia en el punto anterior, se determinarán de conformidad con la práctica metrológica.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran 0 y 150 dB. 0 dB porque existe la posibilidad de no realizar una compactación del hormigón mediante maquinaria que produzca molestias de ruido. El límite superior considerado es 150 dB como un valor extremo de emisiones de ruido que difícilmente se pueden producir.

Con respecto a la pendiente, es una función descendente porque a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera. La pendiente es fuerte debido a que los efectos de las molestias a partir de los 80 dB aumentan exponencialmente. La forma de la curvatura es en S para reflejar las diferencias entre una emisión de ruido situada por encima o por debajo de los 80 dB, valor límite para la salud del operario.

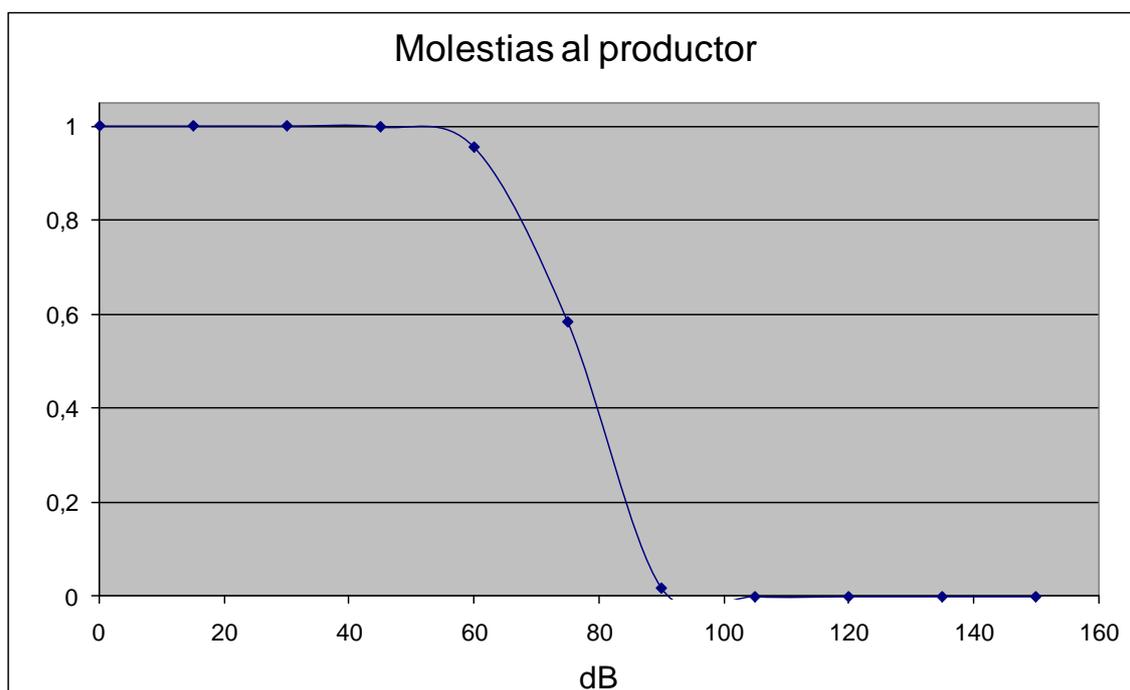


Fig. 4.4 Función de valor del indicador molestias para el productor

4.2.2.3 Seguridad del operario

El indicador de seguridad del operario pretende evaluar el riesgo a accidente que corre el trabajador que ejecutará cada una de las alternativas. Por lo tanto, analizando los peligros que corre el operario, se cuantificará cuanto de segura es la ejecución de cada soporte estructural que se pretenden estudiar.

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Disminuir las probabilidades de accidente laboral.
- Mejorar las condiciones de trabajo del trabajador.

Estrategias

Se define como accidente de trabajo, “toda lesión corporal que el trabajador sufra con ocasión o a consecuencia del trabajo que ejecuta por cuenta ajena” (artículo 115 de la Ley General de la Seguridad Social de 1994). En esta definición, se incluyen tanto las lesiones que se producen en el centro de trabajo, como aquellas producidas en el trayecto habitual entre éste y el domicilio del trabajador. Estos últimos serían los accidentes llamados “in itinere”.

Desde el punto de vista técnico-preventivo, se entiende por accidente de trabajo todo suceso anormal, no querido ni deseado, que se presenta de forma brusca e inesperada y normalmente es evitable, que interrumpe la continuidad del trabajo y puede causar lesiones a las personas.

Para evitar cualquier accidente de trabajo se requiere de un conjunto de técnicas y procedimientos que tienen por objeto eliminar o disminuir el riesgo de que se produzcan los accidentes de trabajo.

La legislación española está dotada de una Ley de Prevención de Riesgos Laborales (LPRL). Ésta tiene por objetivo promover la seguridad y la salud de los trabajadores mediante la aplicación de medidas y el desarrollo de las actividades necesarias para la prevención de riesgos derivados del trabajo.

Para tal fin, la Ley establece los principios generales relativos a la prevención de los riesgos profesionales para la protección de la seguridad y de la salud, la eliminación o disminución de los riesgos derivados del trabajo, la información, la consulta, la participación equilibrada y la formación de los trabajadores en materia preventiva. La Ley también regula las actuaciones a desarrollar por las Administraciones Públicas, así como por los empresarios, los trabajadores y sus respectivas organizaciones representativas (Ley 31/1995, de 8 de noviembre).

Cabe remarcar que la Ley especifica como objetivo “la prevención de los riesgos profesionales” y también “la eliminación o disminución de los riesgos”. Esta disminución de los riesgos es debido a que en la mayoría de las situaciones no existe el riesgo nulo y que aún las correspondientes medidas preventivas adoptadas siempre existe la posibilidad de accidente.

Forma de medición

Para cuantificar el indicador de seguridad del operario, se requiere estudiar las fases del trabajo donde es previsible que se pueda producir un accidente. Se debe estudiar y considerar todo el personal en cada una de las fases, el equipo necesario, material utilizado, el ambiente de trabajo, tiempos, etc.

Para la cuantificación de este indicador se realizará un análisis cualitativo, encargado de identificar y describir los riesgos existentes en el hormigonado y vibrado de los pilares:

- Operación. Encofrado y hormigonado de los pilares.
- Riesgo- Caída a distinto nivel.
- Consecuencias. Lesiones incapacitantes e incluso la muerte.

- Causas. plataforma de trabajo sin protecciones laterales y aberturas exteriores de la obra sin redes de protección.
- Prevención. Dotar de plataformas de trabajo con barandillas en todos sus lados con riesgo y proporcionar redes de protección contra caídas en todo el perímetro de la obra.

Por lo tanto se define la seguridad del operario como función de los siguientes factores:

- Peligrosidad del acceso al puesto de trabajo para ejecutar el pilar.
- Peligrosidad de la estancia donde se realiza el trabajo.
- Duración temporal de los trabajos a realizar para la ejecución del pilar.

En función de estos factores se desarrolla la formulación siguiente:

$$\mathbf{Seguridad = 0.4 \cdot S_A + 0.6 \cdot C_{tt} \cdot S_{ET}}$$

S_A = Seguridad de acceso al puesto de trabajo

S_{ET} = Seguridad de la estancia de trabajo

C_{tt} = Coeficiente del tiempo de trabajo

$$\mathbf{C_{tt} = C_{tc} \cdot C_{tv}}$$

C_{tc} = Coeficiente del tiempo de compactación

C_{tv} = Coeficiente del tiempo de vertido del hormigón

$$\mathbf{C_{tv} = C_s \cdot C_H}$$

C_s = Coeficiente de sección

C_H = Coeficiente del tipo de hormigón

Tabla 4.6 Formulación para evaluar la seguridad del operario en la ejecución de pilares

A continuación se realiza una descripción de cada uno de los factores presentes en la fórmula para la evaluación de la seguridad del operario.

Seguridad de acceso al puesto de trabajo

Este factor evalúa el peligro relacionado con el acceso del operario al puesto donde realizará las tareas de hormigonado del pilar y la compactación del hormigón.

Seguridad de acceso al puesto de trabajo (S_A)	
Plataforma elevadora	1
Torres escalera equipadas con barandillas	0.7
Escalera convencional	0.4
Sin medios	0

Tabla 4.7 Valoración de la seguridad del acceso al puesto de trabajo (S_A)

Seguridad de la estancia de trabajo

Existen distintos modos de trabajo a disposición del operario para ejecutar los pilares. En este punto se identifican y clasifican según su peligrosidad. Algunas de las distintas plataformas de hormigonado existentes son:

- Torre de andamio alrededor del pilar.
- Plataformas elevadoras
- Plataforma universal de pilares sobre encofrado.
- Torres móviles o andamios laterales.
- Escaleras convencionales



Fig. 4.5 De izquierda a derecha, de arriba abajo: ejemplo de torre - andamio alrededor del pilar, ejemplo de hormigonado mediante plataforma elevadora, ejemplo de plataformas universales sobre encofrado y ejemplo de torre-andamio móvil utilizado para el hormigonado de pilares.

A continuación se describen los riesgos de cada una de las opciones para la ejecución de los pilares:

- Torre - andamio alrededor del pilar: esta plataforma permite conseguir un espacio amplio para trabajar y protegido por barandillas para evitar caídas. El agujero central permite trabajar con comodidad y no tener que asomarse o sacar parte del cuerpo de la plataforma para realizar las operaciones.

El riesgo surge en el momento de subir y bajar de la plataforma.

- Plataformas elevadoras: Se elimina el riesgo de subir y bajar de la plataforma debido a que la plataforma es móvil en este sentido. El riesgo surge en que para realizar el trabajo y esfuerzos, se debe sacar parte del cuerpo de la plataforma, aumentando las probabilidades de caídas si no se dispone de arnés.
- Plataforma universal de pilares sobre encofrado: El sistema es parecido al de la torre-andamio. La plataforma de trabajo puede ser algo más reducida pero el trabajo se realiza dentro de ésta evitando sacar parte del cuerpo.

El riesgo aparece también en el momento de subida y bajada de la plataforma.

Un riesgo de mayor importancia aparece en la utilización de hormigones autocompactantes. Con la utilización de estos hormigones aumenta el riesgo de apertura de los encofrados, esto implicaría la inestabilidad de la plataforma de trabajo con el posible accidente laboral asociado.

- Torres móviles o andamios laterales: es una alternativa económica que permite hormigonar con una sola torre móvil todos los pilares. El riesgo viene asociado a la subida y bajada del andamio mas el riesgo asociado a realizar esfuerzos y operaciones fuera de la plataforma aumentando el riesgo de caída.

Una vez analizadas todas las opciones de trabajo se indica la puntuación otorgada a cada una de ellas para dar valor al coeficiente “Seguridad de la estancia de trabajo” (S_{ET}).

Seguridad de la estancia de trabajo (S_{ET})		
MODO DE TRABAJO	HORMIGÓN VIBRADO	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE
Torre alrededor de pilar	1	1
Plataforma elevadora	0.7	0.7
Plataforma universal sobre encofrado	1	0.8
Torre móvil o andamio	0.5	0.5
No utilización de cualquier tipo de plataforma, plataforma sin barandillas o utilización de escaleras convencionales	0	0

Tabla 4.8 Puntuaciones para la cuantificación del indicador según el modo de trabajo utilizado.

Cualquier otro modo de trabajo que no esté contemplado en esta selección, debe ser comparado con los anteriormente nombrados y asignarle un valor según el grado de riesgo considerado.

Coefficiente de tiempo de trabajo (C_{tt})

Uno de los factores de los que depende el riesgo del operario no es tan solo las condiciones de contorno que le rodean, sino que también el tiempo al que se expone a ese riesgo.

El tiempo de ejecución de los pilares, depende del tiempo destinado a verter el hormigón dentro del encofrado mediante cubilote y el tiempo que se tarde en compactar el material.

A continuación se definen los coeficientes que cuantifican el tiempo total que el operario está expuesto a algún riesgo en la ejecución de pilares:

- Coeficiente del tiempo de compactación (C_{tc})

El tiempo que el operario emplea en vibrar el hormigón depende de la tipología del material y de la consistencia de éste.

Si el hormigón es autocompactante el tiempo empleado es nulo y por este motivo se le asigna al coeficiente la puntuación máxima según estas características.

Si el hormigón necesita ser vibrado, según el artículo 71.5.1 *Compactación del Hormigón*, de la EHE-08, la compactación es función de la consistencia y la trabajabilidad del hormigón.

La tabla 70.2 de la EHE-08 indica el medio de compactación más recomendable en función de la consistencia del hormigón:

Consistencia	Tipo de Compactación
Seca	Vibrado enérgico
Plástica	Vibrado normal
Blanda	Vibrado normal o picado con barra
Fluida	Picado con barra

Tabla 4.9 Tabla 70.2 de la EHE-08

Aún así, según el artículo 71.5.2 *Compactación del hormigón de la EHE-08*, explica que en los hormigones de alta resistencia se puede utilizar la compactación por vibración, incluso con consistencias fluidas o líquidas. Esto es porque debido a su mayor cohesión, la segregación durante el vertido es menor.

Según los criterios descritos anteriormente, se asignan las puntuaciones correspondientes para el coeficiente del tiempo de compactación, entendiéndose que el mayor valor de todos corresponde a un tiempo menor de exposición al riesgo.

Coeficiente del tiempo de compactación		
<i>Hormigón Autocompactante</i>		1
<i>Hormigón vibrado</i>	<i>Consistencia líquida</i>	0.8
	<i>Consistencia fluida</i>	0.6
	<i>Consistencia blanda</i>	0.4
	<i>Consistencia plástica</i>	0.2
	<i>Consistencia seca</i>	0

Tabla 4.10 Puntuaciones del coeficiente del tiempo de compactación

- *Coeficiente del tiempo de vertido del hormigón (C_{tv})*

Otro factor que influye en el tiempo de ejecución del pilar es el tiempo que se tarda en verter el hormigón y llenar todo el encofrado. Este trabajo depende del tamaño del pilar, en este caso de la sección, ya que la altura va a ser la misma en cada alternativa, y del tipo de hormigón utilizado.

o *Coeficiente de sección (C_s)*

Este coeficiente evalúa y cuantifica el tiempo de llenado del hormigón según el tamaño del encofrado. Según la sección del pilar, se requerirá una cantidad de hormigón menor o mayor y esto implicará un tiempo de llenado menor o mayor.

Las puntuaciones asignadas según la sección son las siguientes:

Coeficiente de sección	
25x25 cm ²	1
30x30 cm ²	0.8
35x35 cm ²	0.6
40x40 cm ²	0.5
45x45 cm ²	0.25
50x50 cm ²	0

Tabla 4.11 Puntuaciones del coeficiente de sección

o *Coeficiente del tipo de hormigón (C_H)*

Uno de los factores importantes en el tiempo de vertido es la tipología del hormigón, es decir, la utilización de un hormigón convencional que requiere compactación o un hormigón autocompactante.

El artículo 71.5.1 Vertido y colocación del hormigón, de la EHE-08, no permite la colocación en obra, tongadas de hormigón cuyo espesor sea superior al que permita una compactación completa de la masa. El vertido en grandes montones y su posterior distribución por medio de vibradores no es recomendable, ya que produce una notable segregación en la masa del hormigón.

El empleo de aditivos superplastificantes y el elevado contenido de finos en hormigones de alta resistencia, los hace muy fluidos, permitiendo unas tongadas de mayor espesor que un hormigón convencional, si bien resulta necesaria una mayor energía de compactación.

Según el artículo 71.5.2 Compactación del hormigón, de la EHE-08, explica que el espesor de las tongadas en que se extienda el hormigón, estará en función y eficacia del procedimiento de compactación empleado. Como regla general, este espesor estará comprendido entre 30 y 60 centímetros.

Debido a las recomendaciones de la EHE, un hormigón que requiere de compactación, obligará a verter el material en distintas tongadas de diferentes espesores. Esto requerirá más tiempo que un hormigón autocompactante, el vertido del cual se realiza con mayor rapidez al no requerir de tongadas para vibrar el material. Según estos criterios las puntuaciones para el coeficiente del tipo de hormigón (C_{TH}) asignadas son:

Coeficiente del tipo de hormigón	
<i>Hormigón autocompactante</i>	1
<i>Hormigón vibrado</i>	0.6

Tabla 4.12 Puntuaciones del coeficiente del tipo de hormigón

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0 a 1. Debido al análisis cualitativo que se realiza de la seguridad en la ejecución de las alternativas. El resultado de la valoración está comprendida en el intervalo [0,1].

Con respecto a la pendiente es una función ascendente porque a medida que se mejora la seguridad mayor es la satisfacción que se genera.

La forma de la función es prácticamente recta. El motivo de esta recta es que no se identifica una ejecución que varíe la seguridad extremadamente respecto a las otras, si no que las mejoras entre ellas se generan de forma gradual.

En la figura 4.6 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

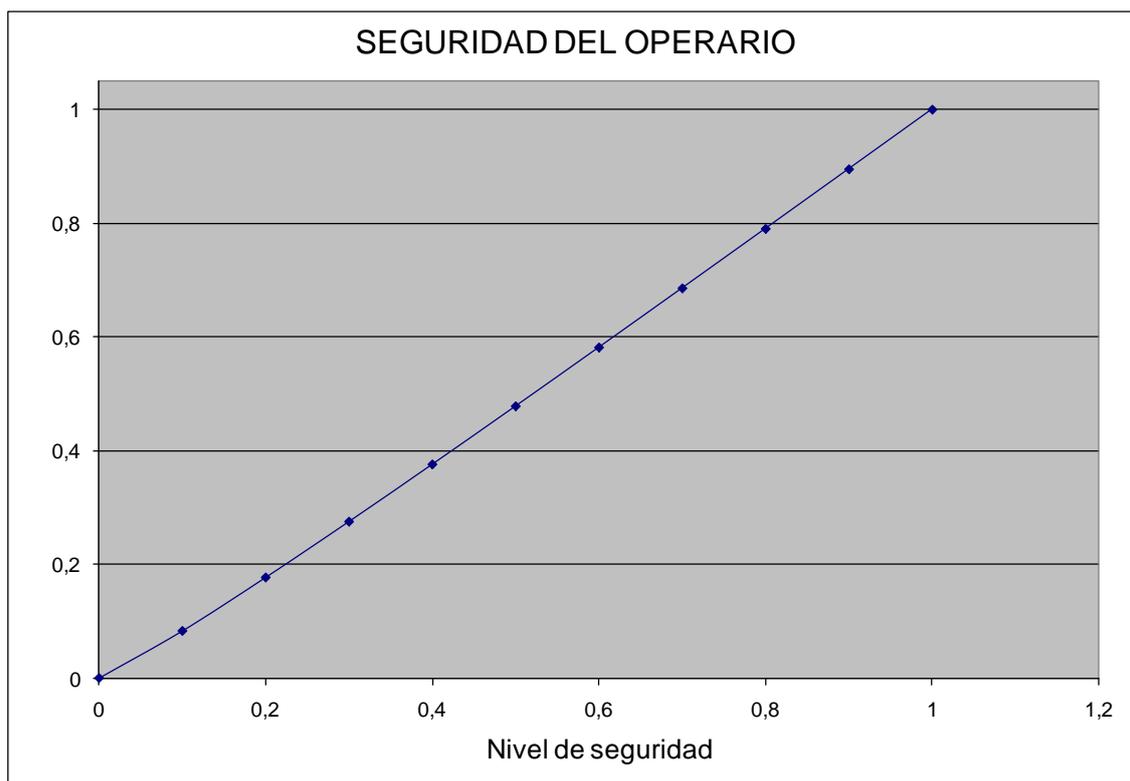


Fig. 4.6 Función de valor del indicador seguridad del operario

4.2.2.4 Molestias al entorno

Este indicador pretende reflejar las consecuencias que genera la ejecución de pilares a su entorno, es decir, a todas esas personas que forman parte de las condiciones de contorno de la obra y que sus actividades se ven perjudicadas, en menor o mayor medida, por la ejecución de las alternativas de estudio.

Objetivo

El objetivo que se pretende con este indicador es:

- Minimizar las molestias que se producen durante la construcción de pilares al entorno.

Estrategias

Toda obra, aunque siempre persigue el propósito de proporcionar un mejor servicio y mayor calidad a la sociedad, en el período de construcción genera molestias para el entorno. Estas deben reducirse en cuanto sea posible para que las personas ajenas a la obra que desarrollan alguna actividad alrededor de ella, no se vean afectadas.

Las molestias a terceros se pueden clasificar según el tipo de molestia. Estas pueden ser de movilidad, ruido, suciedad, vibraciones, etc.

Estas molestias pueden tener un peso mayor o menor según la posición geográfica donde está situada la obra. Generará mayores problemas una obra situada en el centro de la ciudad que una situada en campo abierto.

Centrando las molestias entorno a las producidas debido a la ejecución de pilares, se puede identificar:

- Molestias de movilidad que puede generar un camión hormigonera o grúa en ciudad para el hormigonado de pilares.
- Molestias de polvo y residuos que genera una obra.
- Ruido generado en el hormigonado y compactación del hormigón.

Molestias descartadas para la cuantificación del indicador

De las molestias identificadas, la generación de polvo y residuos no se considerará para la cuantificación de este indicador. Las diferencias entre distintas alternativas de pilares no son importantes y añadir esta variable diluiría la discriminación entre distintas opciones.

Molestias escogidas para la cuantificación del indicador

En una obra, por temas legales y de seguridad, las molestias de movilidad se minimizan al máximo en cuanto es posible. La molestia viene condicionada por las condiciones de contorno de las que está rodeada la obra, pero es el productor quien debe intentar minimizar estas molestias en cuanto le sea posible.

La cuantificación del indicador se realizará también mediante la cuantificación de la contaminación acústica producida en la ejecución del pilar.

La contaminación acústica es uno de los problemas dentro las ciudades que más afecta a la sociedad. El estrés, la psicosis, las alteraciones nerviosas y emocionales y la impotencia son, entre otros, los principales efectos de la contaminación acústica, convirtiéndose así en un latente y constante peligro que atenta contra la salud fisiológica y psíquica de la persona.

Las molestias debidas al ruido se pueden clasificar en dos: molestias producidas por una larga exposición al ruido o molestias por ruido producido en horario nocturno.

En principio, la mayor parte de las obras de edificación no suelen requerir de la importancia y complejidad necesaria como para necesitar trabajos nocturnos. La mayor parte de las normativas municipales en España, no permiten la realización de obras de construcción durante las 22 y 8 horas del día, salvo urgencia. En construcción de pilares no suele darse esta urgencia y por lo tanto esta exposición de ruido no se tendrá en cuenta.

En cambio las molestias debidas a una larga exposición al ruido si son importantes de estudiar debido a las diferencias de ruido que existe según la metodología con que se ejecutan los pilares.

El Doctor Cheuk Fan Ng, profesor asociado de psicología en la Athabasca University, publicó en el año 2000 el estudio Effects of building construction noise on residents, en el Journal of Environmental Psychology. En este estudio se analizó los efectos del ruido de un edificio en construcción en los residentes próximos a la obra. El edificio de construcción se situaba próximo a una residencia de estudiantes del campus universitario de Athabasca.

La investigación pretendía hallar que efectos emocionales y psicológicos negativos se producían sobre los estudiantes así como los efectos sobre la vida cotidiana y sobre el rendimiento académico de los estudiantes.

Las conclusiones que se obtuvieron al final de la investigación fueron:

- Los residentes encontraron muy desagradable el ruido producido en la obra. De una lista de 12 ruidos habituales en el campus, el ruido de la obra fue valorado como el segundo peor.
- Los estudiantes que vivían más cerca de la obra coincidieron que se distraían con mayor facilidad, en comparación con los que vivían más lejos. También confirmaron que el ruido modificaba e interfería en sus vidas cotidianas, dificultando así el estudio y la lectura. Esto coincidió con la ley de Yerkes-Dodson y los descubrimientos de Weinstein's (1974, 1977) que concluían que el ruido perjudica las actividades intelectuales.
- El ruido de la construcción despertaba a los estudiantes interrumpiendo su descanso y dificultando el relax de éstos, siendo éste uno de las mayores quejas de los residentes.
- Los residentes reflejaron también la interferencia del ruido con la comunicación por teléfono y en sus habitaciones, teniendo que aumentar el tono de voz y disminuyendo la calidad de sus relaciones sociales y sus actividades cotidianas.

Debido a las distintas molestias que produce el ruido de una obra, se considera importante estudiar el efecto de éste en su entorno. Por lo tanto se cuantificará el efecto producido por el ruido de la obra a su entorno para así conocer el efecto social que produce la ejecución de los pilares.

Finalmente, a modo informativo, es interesante aportar que la Organización Mundial de la Salud (OMS), considera los 50 dB (a), como el límite superior deseable para el confort. En España, se establece como nivel de confort acústico los 55 dB. Por encima de este nivel, el sonido resulta pernicioso para el descanso y la comunicación.

Forma de medición

Para la cuantificación del indicador se utilizan tres variables que describen las molestias al entorno. Estas tres variables son:

- Ruido producido durante la ejecución de los pilares.
- Molestias producidas a los transeúntes debido a la ejecución de los pilares.
- Molestias al tráfico debido a la ejecución de los pilares.
-

A continuación, en la Tabla 4.13 se muestra la forma de valorar las tres molestias.

MOLESTIAS AL ENTORNO				
MOLESTIA	PESO	ALTERNATIVA	CONSECUENCIA	PUNTUACIÓN
RUIDO	70%	Sin utilizar vibrador	Nivel bajo de ruido	10
		Vibrador Eléctrico	Nivel medio de ruido	3
		Vibrador Neumático	Nivel alto de ruido	0
Molestias transeúntes	15%	Nivel Nulo	Nula afectación	10
		Nivel medio	Acera parcialmente intervenida	5
		Nivel alto	Acera cortada	0
Molestias tráfico	15%	Nivel nulo	Nula afectación	10
		Nivel medio	Corte parcial de calle	5
		Nivel alto	Corte total de calle	0

Tabla 4.13 Puntuaciones de las molestias al entorno

Se considera que las molestias a los transeúntes y las molestias al tráfico están, en mayor parte, condicionadas por las características del entorno de la obra. La influencia o capacidad del productor a minimizar éstas molestias es menor que las alternativas de actuación que dispone éste para evitar las molestias de ruido. Por lo tanto, las molestias al ruido son valoradas con un peso del 70% en comparación al 30% de las molestias a los transeúntes y al tráfico.

Cada alternativa será puntuada según indica la Tabla 4.13 y el resultado obtenido es el que debe ser introducido en la función de valor.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0 a 10. Debido al análisis cualitativo que se realiza de las molestias al entorno de la obra en la ejecución de las alternativas. El resultado de la valoración está comprendida en el intervalo [0,10].

Con respecto a la pendiente es una función ascendente porque a medida que se reducen las molestias al entorno mayor es la satisfacción que se genera.

La forma de la función es prácticamente recta. El motivo de esta recta es que no se identifica una ejecución que varíe extremadamente respecto a las otras, si no que la mejora entre las alternativas se produce de forma progresiva.

En la figura 4.7 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

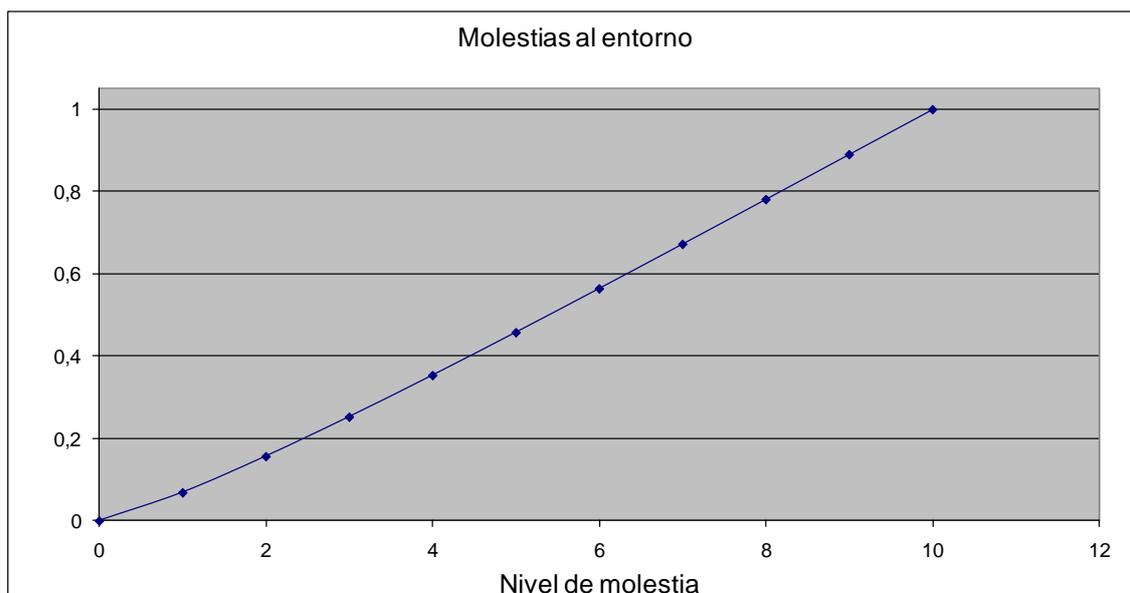


Fig. 4.7 Función de valor del indicador molestias al entorno.

4.2.3 Requerimiento económico

El requerimiento económico pretende recoger y clasificar esos indicadores que cuantifican cualquier acción que tiene como consecuencia un coste/beneficio económico en el proyecto.

Este requerimiento se ha clasificado en dos criterios. Estos dos criterios tienen por objetivo describir y organizar los indicadores en dos grupos. El primer criterio que se observa en la Tabla 4.14 incluye todos los costes directos (materiales, mano de obra, reparaciones, maquinaria, etc.) para la ejecución y obtención final del pilar. El segundo criterio, denominado rendimiento, pretende recoger el resto de repercusiones económicas que genera la construcción de un pilar. Estas repercusiones, por ejemplo, pueden ser los costes de mantenimiento durante la vida útil del pilar.

A continuación, en la Tabla 4.14 se detallan los criterios e indicadores que forman el requerimiento económico.

REQUERIMIENTO	CRITERIOS	INDICADORES
ECONÓMICO	CONSTRUCCIÓN	Coste de ejecución
		Costes de no conformidad
	RENDIMIENTO	Durabilidad
		Habitabilidad

Tabla 4.14 Criterios e indicadores del requerimiento económico.

A continuación se detalla y describe cada uno de los indicadores incluidos en el requerimiento económico del modelo.

4.2.3.2 *Coste de ejecución*

Este indicador evalúa y cuantifica cada alternativa del estudio según su coste de ejecución, es decir, el precio final del producto obtenido teniendo en cuenta la mano de obra, material, medios utilizados, etc.

Objetivo

El objetivo que se persigue con este indicador es:

- Minimizar el coste final de los pilares, cumpliendo con las normativas vigentes y resolviendo de una forma optimizada las solicitudes a las que estará expuesto el pilar.

Estrategias

Es indispensable en cualquier elección, tener en cuenta el desembolso económico que supone cada una de las opciones disponibles. En este estudio, las opciones a analizar son distintas alternativas de pilares y por lo tanto un factor determinante en la toma de decisión es el coste que va a tener cada uno de ellos.

El indicador “coste de ejecución”, pretende premiar a esas alternativas que resuelven las solicitudes a las que estarán sometidas de una forma eficiente económicamente y que permitan un desembolso razonable y económico para el cliente.

Forma de medición

Para la cuantificación de este indicador, requiere primeramente el cálculo del coste de ejecución de cada una de las alternativas. El coste de cada opción de pilar se puede dividir en los costes de las distintas unidades que se muestran en la Tabla 4.15.

COSTES DE EJECUCIÓN
Materiales necesarios para el encofrado
Montaje y desmontaje del encofrado
Acero en barras corrugadas
Hormigón
Mano de obra: oficial de 1era, ayudante y peón ordinario de construcción
Medios auxiliares
Costes indirectos

Tabla 4.15 Desglose del coste de ejecución de un pilar.

Todos estos costes varían en función de la alternativa considerada y son los valores a calcular para posteriormente cuantificar el indicador.

El precio final de ejecución obtenido es el valor que se debe introducir en la función de valor para cuantificar el indicador.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 100 y 1000 € respectivamente. 100 porque actualmente, en esta tesina, no se ha identificado ninguna solución de las alternativas que se estudiarán que baje de este precio. El límite superior, se considera de 1000€ debido a que es una cantidad extrema para un pilar de edificación convencional. De los pilares observados, se han visto cantidades límite de aproximadamente 750€. Sin embargo estos límites pueden ser modificados de acuerdo a las características o a las alternativas que se consideren.

Con respecto a la pendiente es una función descendente porque a medida que se aleja del valor de confort menor es la satisfacción que se genera.

La forma de la curvatura es en S porque se penaliza notoriamente los costes elevados y se premia a esas alternativas que permiten un ahorro económico.

En la Figura 4.8 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

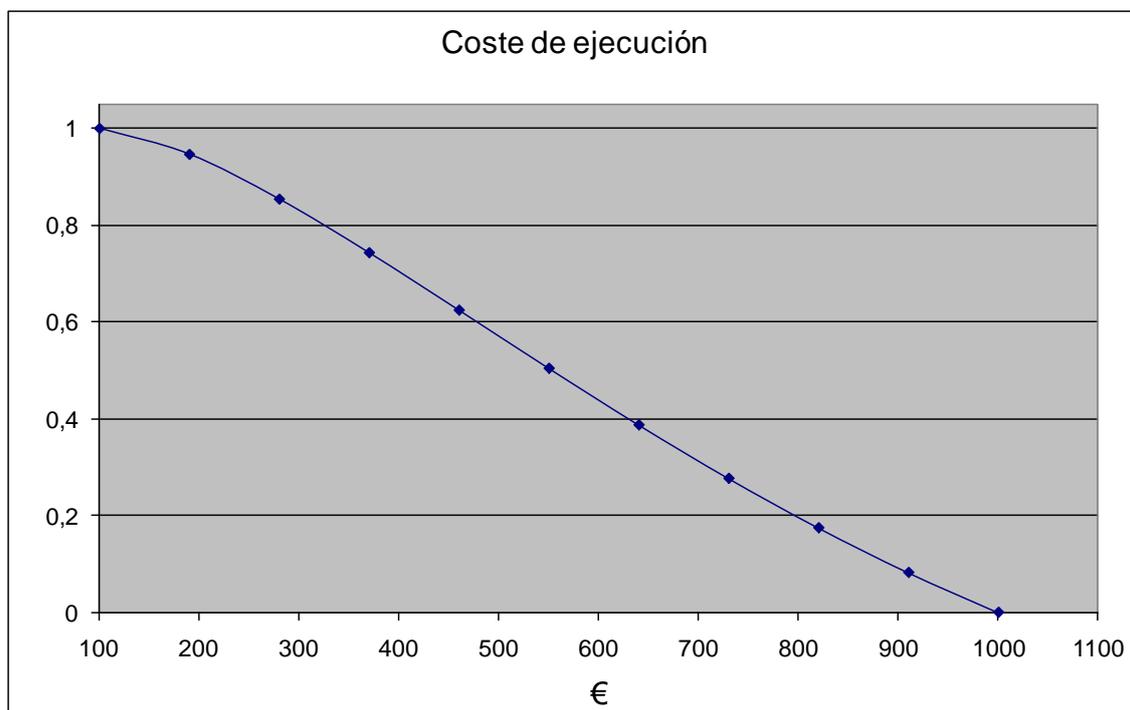


Fig. 4.8 Función de valor del indicador coste del pilar

4.2.3.3 Costes de no conformidad

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Minimizar los costes añadidos asociados a la reparación de pilares que se requiere cuando la ejecución de éstos no ha sido la adecuada o esperada.
- Incrementar el rendimiento de la producción de pilares en una obra, minimizando la cantidad de reparaciones que se realicen.
- Ahorro de materiales, como consecuencia de obtener el producto deseado en primera instancia.

Estrategias

Mediante este indicador, se persigue detectar oportunidades de mejora en el proceso constructivo, potenciando siempre el concepto de prevención en contra del de reacción. El motivo es que conforme avanza la cadena productiva, mayor impacto tiene un problema de calidad que se genere. La Ley protege al cliente frente al contratista, obligando a éste a ejecutar el proyecto con unas características y una calidad preestablecida. En caso de no alcanzarse los objetivos redactados en proyecto, el contratista es quien asume los costes para todas las modificaciones requeridas, no siendo necesario el pago de ellas por parte del promotor. Por lo tanto, no entender o no considerar el concepto "Prevención vs. Reacción" puede transformarse en una clara desventaja.

Se definió el concepto de costo de calidad, como *"el costo incurrido para ayudar al empleado a que haga bien el trabajo todas las veces, y el coste de determinar si la producción es aceptable, mas cualquier coste en que incurre la empresa y/o el cliente porque la producción o el servicio no cumplió las especificaciones o expectativas del cliente"* (Dr. James Harrington).

Por lo tanto, los costes de calidad son una medida de los costes, que se relacionan específicamente con el logro o no logro del producto o con una calidad del servicio, entre ellos los requisitos que al respecto establecen los contratos con los clientes.

Los costes de calidad están asociados a los costes de conformidad y los de no conformidad.

Podemos dividir los costes de no conformidad en: costes de fallos y costes de fallos externos.

Los costes de fallos externos son los asociados después de entregar el producto final y durante la garantía de éste.

Los costes de fallos son los resultantes de los productos que no se ajustan a las especificaciones o a las necesidades del promotor o usuarios. En estos costes están englobados los que incurre la empresa para corregir fallos, defectos y errores encontrados en el producto durante las evaluaciones, antes de que el producto haya sido entregado.

Es importante que el contratista tenga en cuenta estos costes de no conformidad debido a las pérdidas de dinero que le van a provocar y la generación de material derrochado.

Forma de medición

La evaluación de los costes de no conformidad se realiza de una forma cualitativa. Para su cuantificación se realiza una evaluación de los riesgos que aumentan la probabilidad de obtener un producto no conforme con lo acordado en el proyecto. Una vez identificados estos riesgos se procede a evaluar cada una de las alternativas según los criterios pertinentes para conocer qué grado de posibilidades se tiene de obtener un producto erróneo en su ejecución.

Los motivos que pueden originar la obtención de un pilar no aceptable son:

- Mala colocación de la armadura.
- Mala compactación del hormigón.
- Pérdida de lechada en las juntas del encofrado.
-

Partiendo de las causas que proporcionan un producto final no deseado se identifican cuatro parámetros que influyen en las distintas causas. Cada una de las variables influye en obtener un mejor o peor producto. Estos cuatro parámetros son:

- Forma de la sección: una sección circular siempre permite una colocación de la armadura más precisa y con menos problemas de desplazamiento que una sección cuadrada o rectangular. Esto permite que la sección circular se la asocie con un menor número de problemas de ejecución, así como también problemas en la colocación de la armadura. Esto permite obtener un producto con unas cualidades inicialmente mejores que la sección rectangular, considerando las dos con las mismas condiciones de control de ejecución.
- Docilidad del hormigón: la utilización de aditivos y hormigones que facilitan la trabajabilidad del material, y por ejemplo un mejor vibrado permite reducir las probabilidades de obtener coqueras en el producto final, es decir, un producto no deseado.

La docilidad del hormigón, según el artículo 31.5 de la EHE-08, es necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan coqueras.

La docilidad del hormigón se valora determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento, según UNE-EN 12350-2.

Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono son los siguientes:

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	15-20

Tabla 4.16 Consistencias del hormigón según el artículo 31.5 de la EHE-08

- **Tipo de hormigón:** la utilización de un hormigón autocompactante, reduce enormemente la aparición de coqueras frente uno vibrado. Esto es debido a que no necesita vibrado para su compactación. También un hormigón vibrado corre el riesgo que durante la compactación, se produzca el contacto del vibrador con la armadura produciéndose la sacudida de alguna barra, pudiéndola aislar y restarle adherencia al mortero y por lo tanto, un producto de menor calidad.
-
- **Pérdida de lechada en juntas:** es importante un control en las juntas del encofrado para asegurar que no se pierde lechada por ellas. Las posibles pérdidas, dan como resultado un producto final no deseado. Éste control debe ser mucho más elevado en hormigones autocompactantes porque, aunque estos hormigones se ven favorecidos por la no necesidad de vibrado, sus empujes hidrostáticos causan una mayor pérdida de lechada por una misma junta que un hormigón convencional.

Por lo tanto a partir de estas premisas, se proporciona la siguiente tabla para valorar el riesgo de cada una de las alternativas a obtener un producto no conforme. A partir de las Tablas 4.17 se cuantifica cada uno de los pilares a estudiar asignando una puntuación final a partir de las ponderaciones mostradas en la tabla.

CRITERIO	%	ALTERNATIVAS	HORMIGÓN VIBRADO	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE
SECCIÓN	20%	Rectangular	0	0
		Cuadrada	0.5	0.5
		Circular	1	1
CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN	35%	Seca	0	1
		Plástica	0.2	
		Blanda	0.4	
		Fluida	0.6	
		Líquida	0.8	
NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN	45%	Control nulo	0	0
		Nivel normal	0.6	0.4
		Nivel intenso	1	1

Tabla 4.17 Criterios para evaluar el riesgo de obtener un pilar no conforme con la calidad exigida

El valor final obtenido en cada alternativa debe ser introducido en la función de valor para cuantificar el indicador.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0 a 1 debido a que la valoración cualitativa da como resultado un valor dentro del intervalo [0,1].

Con respecto a la pendiente es una función ascendente porque una mejor valoración cualitativa de la ejecución de cada una de las alternativas implica menores costes de reparación de un pilar incorrecto.

La forma de la función es prácticamente recta debido a que las mejoras entre las alternativas se producen de forma progresiva.

En la figura 4.7 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

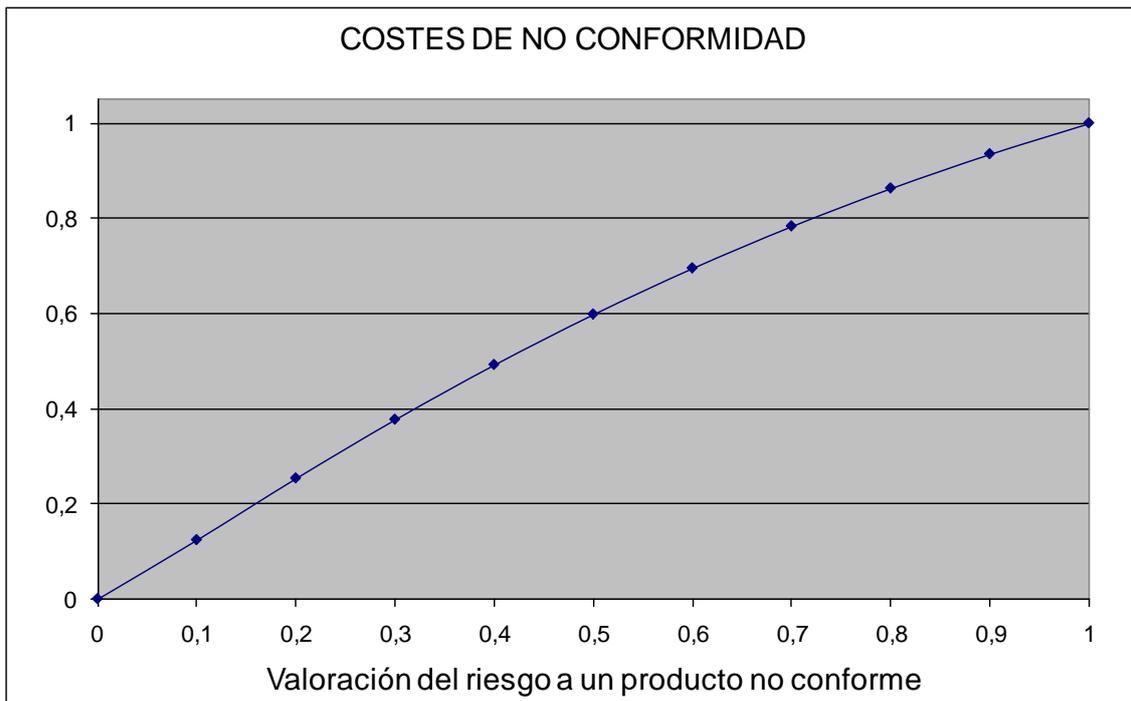


Fig. 4.9 Función de valor del indicador costes de no conformidad

4.2.3.4 Durabilidad

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Obtener productos más duraderos con el mínimo desembolso económico de mantenimiento posible.
-

Estrategias

Se define la durabilidad de una estructura como la capacidad que tiene ésta, durante la vida útil para la cual se ha proyectado, de conservar inalterables sus condiciones físicas y químicas, sometida a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones, ya consideradas en su análisis estructural.

La fase de ejecución del elemento estructural realizado con calidad, sobre todo en la etapa de curado, influye notablemente en la obtención de una estructura estable. Algunas de las medidas que se contemplan en la estrategia para la obtención de una durabilidad adecuada son:

- Elección de las formas estructurales adecuadas.
- Calidad adecuada del hormigón.
- Espesor de recubrimiento adecuado para ofrecer protección a las armaduras.
- Control del valor máximo de las fisuras.

- Colocación de protecciones superficiales en caso de ambientes muy agresivos.
- Prevención contra la corrosión de las armaduras.

Todas estas medidas se contemplan dentro de la EHE-08 que proporciona los valores para la vida útil exigida en proyecto.

Por lo tanto, para cada alternativa la durabilidad mínima y la vida útil exigida será la misma y no será un factor diferencial entre las distintas opciones que se analizarán. La variable que si discriminará entre alternativas, será el coste con el cual se alcanza esa durabilidad exigida. Ésta variable será la utilizada para la cuantificación del indicador.

Forma de medición

El indicador se cuantifica mediante el coste económico necesario para la obtención de una calidad mínima exigida. Esta calidad viene prescrita en el proyecto y el constructor la debe garantizar. Para ello, una vez entregada la obra con el nivel de calidad exigido, existe la Garantía Decenal, de obligada contratación, exigida por ley desde el 6 de mayo de 2000. Esta garantía va dirigida a promotores y/o constructores, en este caso para obras de nueva construcción destinadas a edificios de viviendas.

La Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación, tiene por objeto:

- Regular el proceso de la edificación.
- Establecer las garantías necesarias para la adecuada protección de los intereses de los usuarios.

Obliga a promotores a contratar una póliza de seguros que garantice, durante 10 años, el resarcimiento de los daños materiales causados en el edificio por vicios o defectos que tengan su origen o afecten a la cimentación, **los soportes**, las vigas, los forjados, muros de carga u otros elementos estructurales que comprometan directamente la resistencia mecánica y estabilidad del edificio.

Con esta referencia económica y temporal, se extrae que la variable económica que se utiliza para la cuantificación del indicador de durabilidad, es el coste de mantenimiento decenal de los pilares en estudio. Este coste es una valoración del montante económico que supone mantener los pilares en los primeros diez años después de su construcción, atendiendo a las operaciones de mantenimiento contenidas en el calendario de mantenimiento del proyecto.

El coste real del mantenimiento es difícil de prever, ya que intervienen distintas circunstancias impredecibles y múltiples factores como la actitud de los usuarios, tiempo entre la detección y reparación de los desperfectos, etc. El objetivo de este indicador pues, es establecer el grado de viabilidad económica del edificio durante los primeros diez años. Es decir, unas soluciones con un bajo presupuesto de construcción, podrían implicar un elevado coste de mantenimiento superando en exceso el capital inicialmente invertido, pudiendo llegar a ser económicamente inviable ese mantenimiento.

Para valorar los costes de mantenimiento decenal de cada una de las alternativas se tendrán en cuenta:

- Operaciones de mantenimiento preventivo definidas en el proyecto. En estas operaciones se incluyen los costes de las inspecciones, revisiones, informes o dictámenes de los pilares.
- No se tienen en cuenta los costes relacionados con reparaciones consecuencia de accidentes o catástrofes naturales o actos vandálicos.
- El coste de mantenimiento vendrá determinado por la solución constructiva escogida en cada alternativa, así como también las calidades seleccionadas, controles de calidad y ensayos correspondientes.

Una vez cuantificado el coste de mantenimiento decenal de cada alternativa, el valor (en Euros) debe ser introducido en la función de valor para obtener la cuantificación del indicador económico de durabilidad.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran de 0 y 50 € respectivamente. 0 € se considera el caso ideal, donde el consumidor de la vivienda no debe destinar ninguna cantidad económica para el mantenimiento del pilar. Los 50€ se considera un valor excesivo a pagar para la durabilidad de los 10 primeros años.

Con respecto a la pendiente, se trata de una función descendente por que a medida que el desembolso económico es mayor, menor es la satisfacción. La forma de la curvatura es en S para penalizar un coste excesivo y recompensar las alternativas que permitan un ahorro para el consumidor. En la Figura 4.10 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

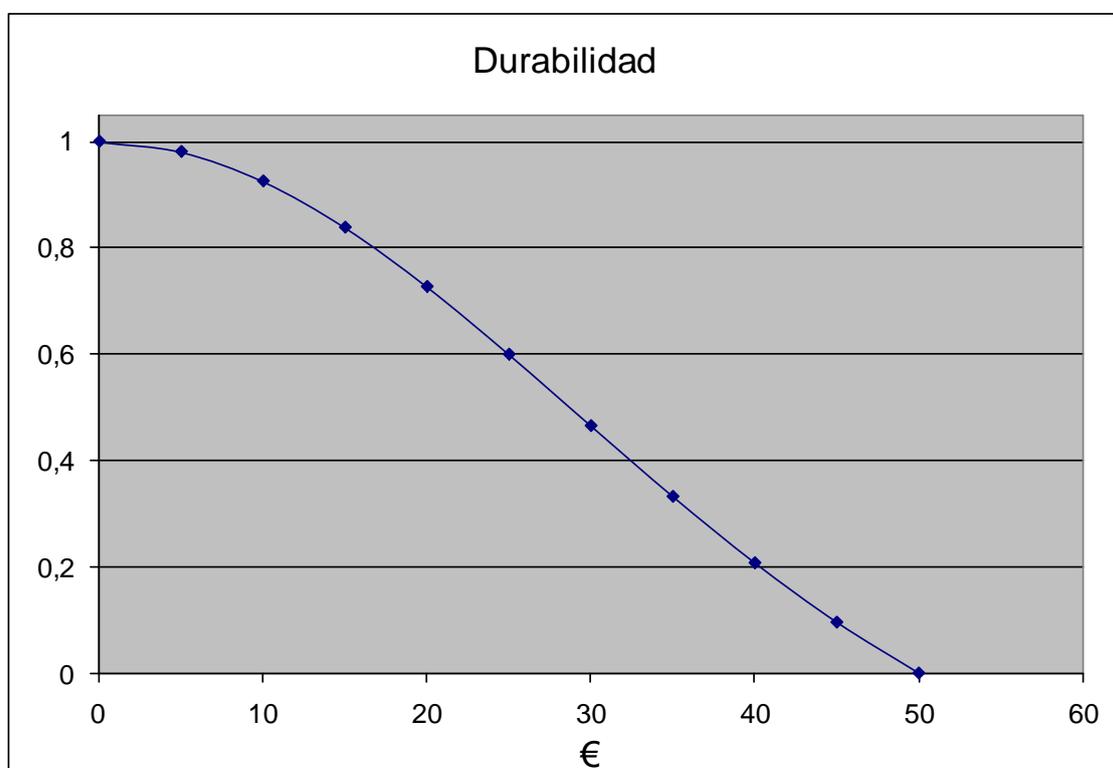


Fig. 4.10 Función de valor para la cuantificación del indicador de durabilidad.

4.2.3.5 *Habitabilidad*

Objetivo

Los objetivos que se pretenden con este indicador son:

- Promover secciones que aumenten y optimicen el espacio disponible para el propietario final de la vivienda donde se encuentra el pilar de estudio.
- Aumentar el espacio habitable disponible y consecuentemente obtener un rendimiento económico mayor para el promotor.

Estrategias

La estrategia del índice de habitabilidad viene determinada por dos puntos de vista. Éstos son la influencia de la habitabilidad sobre el propietario-usuario de la futura vivienda y otro la del promotor.

Para los intereses del usuario, el indicador económico de habitabilidad se refiere al ámbito de la arquitectura dedicada a asegurar unas condiciones mínimas de salud y confort en los edificios. Una de las variables de la habitabilidad son las dimensiones mínimas exigidas de un habitáculo. La normativa vigente en España exige un tamaño mínimo tanto para las viviendas como para sus distintas piezas (dormitorios, aseos, salón, etc.). Por ejemplo, para los pisos de protección oficial exige construir viviendas de, como mínimo, de 40 metros cuadrados.

Los pilares son un elemento importante a tener en cuenta dentro de la habitabilidad debido a la diferencia existente entre el espacio ocupado por la edificación y el espacio habitable que existe en ésta. En la construcción del edificio, por culpa del espacio ocupado por la estructura, instalaciones, etc. se pierde un espacio libre inicialmente en planta y que no podrá ser aprovechado como espacio habitable. Todo éste espacio perdido no podrá ser aprovechado por el usuario viendo reducidas las dimensiones de su propiedad.

Esta reducción de espacio también afecta al promotor del edificio en la compra-venta de éste, traduciéndose en una reducción de beneficios si ve disminuido el espacio habitable disponible. Debajo de estas líneas se muestra un ejemplo del precio de la vivienda de algunas comunidades autónomas españolas. La Tabla 4.18 pretende reflejar el coste del espacio ocupado por distintas secciones de pilares.

Comunidad	€/m ²	COSTE DEL ESPACIO OCUPADO POR UN PILAR (€)					
		25x25	30x30	35x35	40x40	45x45	50x50
Catalunya	3707	231.68	333.63	454.1	593.1	750.6	926.7
Madrid	3405	212.81	306.45	417.11	544.8	689.5	581.2
Extremadura	1515	94.68	136.35	185.58	242.4	306.7	378.7
Murcia	1495	93.43	134.55	183.13	239.7	302.7	373.7

Tabla 4.18 Precio medio de la vivienda según la Sociedad de Tasación (2009) para cada comunidad autónoma.

En conclusión, el indicador de habitabilidad intenta cuantificar la importancia del ahorro de espacio estructural para convertirlo en espacio habitable por los motivos siguientes:

- Cuánto mayor espacio ahorrado comportará un mejor aprovechamiento del espacio, proporcionando mayores dimensiones habitables. Esto comporta mayor confort para el usuario, proporcionando espacios más amplios, mejores condiciones en plazas de aparcamiento, etc.
- Con un mayor ahorro del espacio es posible incrementar los ingresos del promotor, proporcionándole mayor espacio vendible.
- En casos dónde el espacio mínimo exigido sea un factor crítico, los beneficios económicos sobre el promotor se pueden multiplicar debido a la posibilidad de la comercialización o no de un espacio.

Forma de medición

El ahorro de espacio se puede cuantificar mediante medidas espaciales o mediante variables económicas.

Se puede considerar que al tratarse de un indicador económico, la forma de medir el indicador de habitabilidad es mediante el beneficio generado gracias a éste ahorro de espacio. Debido a la variabilidad del precio del m² según la ciudad y/o región del territorio hace descartar esta fórmula. La cuantificación del indicador y la función de valor no sería homogéneo en función de la posición geográfica dónde se encontrara el proyecto.

Finalmente, la forma de cuantificar el indicador, será mediante el cálculo del espacio físico ocupado por el pilar. Un espacio mayor de ocupación penalizará al indicador, en cambio un espacio menor, generando un ahorro de área y mayores beneficios para el usuario y promotor, proporcionará una valoración más positiva del indicador. En la función de valor se debe introducir pues el área que ocupa la sección del pilar en centímetros cuadrados.

Función de valor

Los límites inferior y superior de la función de valor se consideran 625 y 2125 cm² respectivamente. 625 cm² porque se trata de la sección mínima establecida en la EHE-08 para soportes de edificación (25x25 cm²). El límite superior es 2125 cm², sección ocupada por un pilar de 45x45cm², debido a que las alternativas que se estudiarán posteriormente no exceden esta cantidad. Sin embargo, este límite puede modificarse de acuerdo a las características o a las alternativas que se consideren.

Con respecto a la pendiente es una función descendente por que a medida que se aumenta el área ocupada por el pilar, la satisfacción que se genera es menor.

La forma de la curvatura es cóncava porque se penaliza notoriamente esas soluciones que no realizan una optimización del espacio ocupado.

En la Figura 4.19 se muestra la función de valor considerada para este indicador.

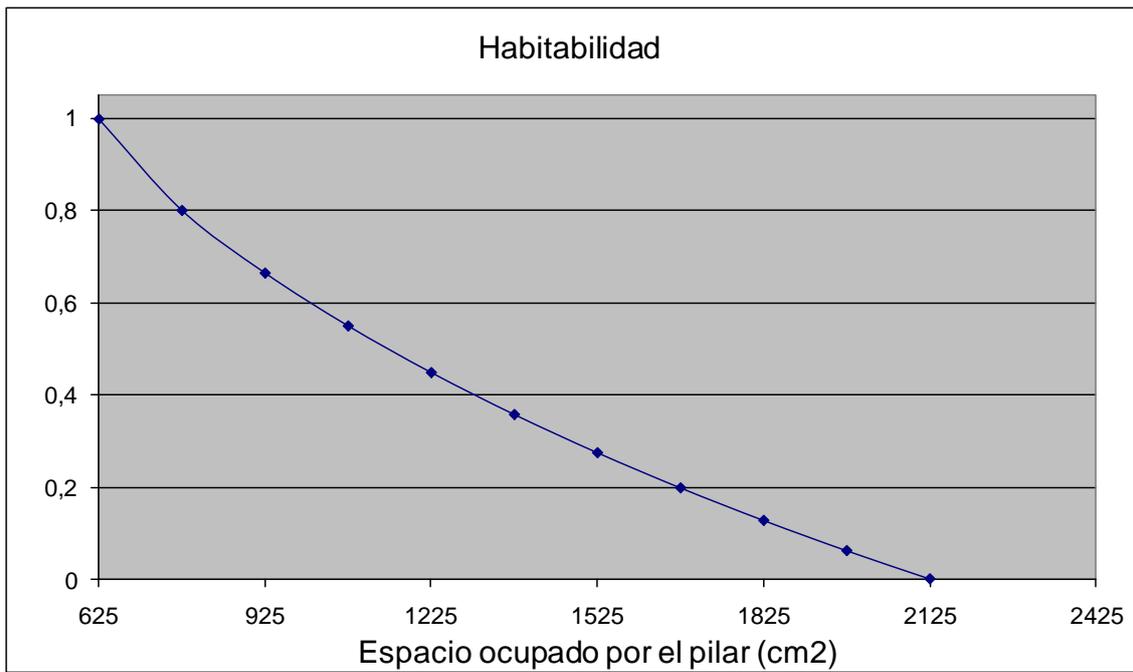


Tabla 4.19 Función de valor del indicador habitabilidad

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha desarrollado una herramienta enfocada a la discriminación de pilares de edificación. Esta herramienta utiliza los indicadores descritos en el Capítulo 4 para evaluar distintos parámetros y mediante las funciones de valores se cuantifican los indicadores y cada una de las alternativas asignándoles un valor entre 0 y 1.

Este capítulo se propone evaluar distintas alternativas de pilares mediante la herramienta desarrollada anteriormente. Para ello se han elegido diferentes variables para formar las distintas alternativas posibles y ser evaluadas.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir las variables que conformaran las distintas alternativas de pilares a estudiar.
- Evaluar las distintas alternativas definidas mediante la metodología desarrollada en los capítulos anteriores.
- Comparar las distintas alternativas evaluadas para observar el comportamiento de éstas según cada indicador y requerimiento.

5.2 ALTERNATIVAS DE PILARES

Para la elección de las alternativas de pilares que se van a estudiar poder elegir qué solución es la más sostenible, se utilizan diferentes variables que ayudan a definir distintas opciones de pilares posibles a analizar.

El primer paso antes de definir las variables, es importante remarcar qué elementos van a ser estudiados. Los pilares que van a ser evaluados en el presente capítulo se caracterizan por:

- Las hipótesis de carga son para un pilar medio situado en la planta tercera de una edificación estándar. La altura del pilar es de hasta tres metros y las luces entre pilares consideradas son de 6 metros por 6 metros.
- Las excentricidades consideradas son las mínimas por normativa, $h/20$ (siendo h el canto en milímetros) o 20 milímetros, no considerándose pilares de fachadas.
- El pilar está expuesto a un axil de 2158 kN. y un momento flector de 50 kNm.

Bajo estas características comunes para cada alternativa, éstas se distinguen por los aspectos siguientes:

- Resistencia característica del hormigón utilizado en la ejecución de los pilares.
- Sección de los pilares.
- Compactación del hormigón.

Resistencia del hormigón utilizado en la ejecución de los pilares

Una de las variables para diferenciar distintas alternativas es la resistencia característica del hormigón empleado. Se han escogido tres resistencias distintas para poder observar que comportamiento tienen cada una de ellas en una evaluación de sostenibilidad en pilares. Así se estudian hormigones convencionales y hormigones de alta resistencia. Los tres hormigones empleados son:

- HA-25
- HA-50
- HA-75

Sección de los pilares

Las secciones de los pilares que se analizan en este capítulo se diferencian según su forma. Las opciones que se estudian son:

- Pilares rectangulares
- Pilares circulares

Los pilares que conforman las alternativas, según la resistencia del hormigón empleado, varían el tamaño de su sección. La sección mínima que se considerará en el estudio es la sección rectangular de 25x25, ya que en el artículo 54 de la EHE-08, explica que los soportes ejecutados en obra deberán tener su dimensión mínima mayor o igual a 25 centímetros.

Compactación del hormigón

Los hormigones de las alternativas utilizadas en este capítulo se distinguen por ser:

- Hormigón autocompactante.
- Hormigón vibrado.

Mediante las distintas variables se identifican distintas alternativas de pilares para una edificación convencional. Las alternativas que se evaluarán en los siguientes apartados según las variables descritas anteriormente son:

ALTERNATIVAS			
Alternativa	Resistencia característica del hormigón	Compactación	Sección
1	HA-25	Vibrado	Rectangular
2	HA-25	Autocompacante	Rectangular
3	HA-50	Vibrado	Rectangular
4	HA-50	Autocompacante	Rectangular
5	HA-75	Vibrado	Rectangular
6	HA-75	Autocompacante	Rectangular
7	HA-25	Vibrado	Circular
8	HA-25	Autocompacante	Circular
9	HA-50	Vibrado	Circular
10	HA-50	Autocompacante	Circular
11	HA-75	Vibrado	Circular
12	HA-75	Autocompacante	Circular

Tabla 5.1 Alternativas de pilares consideradas en el presente capítulo

Además de estas alternativas base, para la cuantificación de algunos de los indicadores, también se distinguirán las alternativas por: consistencia del hormigón, encofrados utilizados para la ejecución, nivel de control de la ejecución, etc.

A continuación, en la Tabla 5.2 se muestran las dosificaciones consideradas para los hormigones empleados como alternativas. Estas dosificaciones fueron propuestas por Domench Masó, director de calidad de PROMSA. De esta manera, las dosificaciones son elegidas por una fuente externa eliminando cualquier posibilidad de intencionalidades.

DOSIFICACIONES EMPLEADAS							
MATERIALES		HA-25		HA-50		HA-75	
		B	AC	B	AC	B	AC
Cemento	CEM I (kg)	262	300	450	450	500	500
Adiciones	Filler (kg)	-	100	-	-	-	-
	Nano sílice (kg)	-	-	-	-	10	10
Áridos (kg)		1851	1725	1803	1803	1705	1705
Agua (kg)		145	175	180	195	190	215
a/c		0.55	0.58	0.4	0.43	0.38	0.43
Pozzolith (ligno)	% spc	0.7	0.9	0.3	0.8	0.3	0.8
	(kg)	1.8	2.7	1.4	3.6	1.5	4.0
Glenium (PCE)	% spc	0.3	1.5	0.7	1.3	0.7	1.3
	(kg)	0.8	4.5	3.2	5.9	3.5	6.5

Tabla 5.2 Dosificación del hormigón empleado para las alternativas estudiadas.

5.3 CUANTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES

En este apartado se evalúan las distintas alternativas de pilares posibles mediante los 10 indicadores que componen la herramienta desarrollada en esta tesina para la comparación de pilares de edificación.

5.3.1 Indicadores Medioambientales

A continuación se procede a cuantificar los indicadores medioambientales para cada una de las alternativas. Estos indicadores son: emisiones de CO₂, consumo de hormigón y el consumo de acero.

El cálculo de los tres indicadores requiere el cálculo estructural previo de las distintas alternativas posibles para obtener las dimensiones de cada uno de los pilares. Según las hipótesis y solicitaciones a las que se ven expuestas las alternativas y que han sido mencionadas en el apartado anterior, las dimensiones para cada una de las alternativas de estudio son:

DIMENSIONES			
Hormigón	Sección	Ac (mm ²) ⁱ	As (mm ²) ⁱⁱ
HA-25	40x40	158743	1257
HA-50	30x30	88743	1257
HA-75	25x25	61243	1257
HA-25	D50	195331.5	1018
HA-50	D35	96211.3	792
HA-75	D30	70685.8	679

Tabla 5.3 Dimensiones de cada alternativa según la resistencia característica del hormigón empleado

En el Anejo 1 se muestra el dimensionamiento de los pilares según la resistencia característica de los hormigones considerados, indicando la armadura propuesta.

Según estas dimensiones y los materiales empleados se procede a cuantificar los distintos indicadores medioambientales.

5.3.1.2 *Emissiones de CO₂*

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ se han tenido en cuenta los aspectos siguientes:

- Emisiones producidas durante la extracción y/o fabricación de los distintos materiales primarios.
- Emisiones realizadas durante los transportes del cemento, áridos y aditivos hasta la planta de producción.
- Emisiones durante la mezcla de materiales para la fabricación del hormigón.
- Emisiones de CO₂ considerando los residuos que se producen durante la fabricación del hormigón y de los materiales.
- Emisiones producidas durante el transporte del hormigón para su puesta en obra.

Según estos criterios anteriores, en la Tabla 5.4 se muestran las emisiones obtenidas para cada una de las dosificaciones del hormigón utilizado. En el Anejo 2 se muestran los cálculos realizados para la obtención de las correspondientes emisiones.

ⁱ Área neta de la sección de hormigón, es decir, el área total de la sección descontando el área ocupada por las armaduras.

ⁱⁱ Área de la armadura pasiva.

EMISIONES DE CO ₂						
Hormigón	HA-25		HA-50		HA-75	
	B	AC ⁱ	B	AC	B	AC
kg CO ₂ /m ³	205.84	235.98	342.61	345.04	385.88	388.59

Tabla 5.4 Emisiones de CO₂ de las dosificaciones empleadas en los distintos hormigones

En la Tabla 5.5 se muestran las emisiones de CO₂ producidas por cada alternativa y el valor del indicador obtenido para cada una de ellas.

EMISIONES DE CO ₂					
Hormigón	Compactación	Sección	Volumen (m ³)	Emisiones (kg)	Valor
HA-25	Vibrado	Rectangular	0.476	97.97	0.451
HA-25	AC	Rectangular		112.32	0.314
HA-50	Vibrado	Rectangular	0.266	91.13	0.528
HA-50	AC	Rectangular		91.78	0.511
HA-75	Vibrado	Rectangular	0.183	70.61	0.717
HA-75	AC	Rectangular		71.11	0.712
HA-25	Vibrado	Circular	0.586	120.62	0.238
HA-25	AC	Circular		138.28	0.089
HA-50	Vibrado	Circular	0.288	98.67	0.444
HA-50	AC	Circular		99.37	0.437
HA-75	Vibrado	Circular	0.212	81.06	0.616
HA-75	AC	Circular		82.38	0.604

Tabla 5.5 Emisiones de CO₂ de cada una de las alternativas y valor del indicador de emisiones de CO₂

ANÁLISIS

Es interesante destacar las diferencias entre las emisiones del hormigón convencional y el hormigón de alta resistencia como el HA-75, independientemente de la sección utilizada. Éste emite casi el doble de CO₂ que el HA-25 por metro cúbico de hormigón pero, gracias a sus características mecánicas, es posible un ahorro de volumen de material que permite la reducción de un 35% de las emisiones producidas por el pilar.

ⁱ Hormigón autocompactante

Referente a las secciones de los distintos pilares, la sección circular se ve penalizada en comparación a la sección rectangular, ya que utilizando el mismo hormigón, la primera consume un volumen mayor de material generando más emisiones que una sección rectangular.

5.3.1.3 *Consumo de hormigón*

Según las dimensiones obtenidas en los cálculos que se adjuntan en el Anejo 1 y teniendo en cuenta pilares de 3 metros de altura, el consumo de hormigón y la valoración de cada una de las alternativas son las que se muestran en la Tabla 5.6.

Se considera que la cantidad de material reciclado utilizado en la ejecución de las alternativas es nulo. También, los resultados que se muestran en la Tabla 5.6 son independientes de la compactación del hormigón.

CONSUMO DE HORMIGÓN				
Hormigón	Sección	Ac (mm ²)	Consumo de hormigón (m ³)	Valor
HA-25	Rectangular	158743	0.476	0.367
HA-50	Rectangular	88743	0.266	0.774
HA-75	Rectangular	61243	0.183	0.986
HA-25	Circular	195331.5	0.586	0.181
HA-50	Circular	96211.3	0.288	0.726
HA-75	Circular	70685.8	0.212	0.902

Tabla 5.6 Consumo de hormigón y valor del indicador consumo de hormigón para cada alternativa

Análisis

Como es obvio, el hormigón con menos resistencia característica requiere mayor área y por lo tanto consume una cantidad superior de material que un pilar de hormigón de alta resistencia. Gracias a las propiedades mecánicas del hormigón con más resistencia, es posible un ahorro de material y obtener una valoración mayor.

5.3.1.4 *Consumo de acero*

Mediante el dimensionamiento de las distintas alternativas de pilares que se muestran en el Anejo 1, se ha obtenido la armadura requerida para cada alternativa según la resistencia característica del hormigón empleado. El acero utilizado es un B 500 S y se considera que el éste no proviene de material reciclado.

La Tabla 5.7 muestra la distribución de la armadura longitudinal y la armadura transversal considerada según la resistencia característica del hormigón empleado y la sección considerada.

DISPOSICIÓN DE LAS ARMADURAS			
Hormigón	Sección	Armadura longitudinal	Armadura transversal
HA-25	40x40	4 Φ 16 + 4 Φ 12	Φ 10 cada 15cm
HA-50	30x30	4 Φ 20	Φ 10 cada 20cm
HA-75	25x25	4 Φ 20	Φ 10 cada 20cm
HA-25	D50	9 Φ 12	Φ 10 cada 15cm
HA-50	D35	7 Φ 12	Φ 10 cada 20cm
HA-75	D30	6 Φ 12	Φ 10 cada 20cm

Tabla 5.7 Disposición de las armaduras

A continuación, en la Tabla 5.8 se indica el consumo de acero de cada alternativa según su distribución de armadura. También se indica la cuantificación del indicador obtenida mediante la función de valor.

CONSUMO DE ACERO				
Hormigón	Compactación	Sección	Consumo de acero (kg)	VALOR
HA-25	Vibrado	Rectangular	45.71	0.451
HA-50	Vibrado	Rectangular	37.87	0.732
HA-75	Vibrado	Rectangular	36.17	0.780
HA-25	Vibrado	Circular	40.45	0.649
HA-50	Vibrado	Circular	26.83	0.961
HA-75	Vibrado	Circular	22.7	0.994

Tabla 5.8 Consumo de acero y valor del indicador consumo de acero para cada alternativa

Análisis

Una vez dimensionada la cantidad de acero que requiere cada alternativa se evidencia el ahorro de acero que genera la sección circular frente a una rectangular. Este ahorro se ve reflejado en una mejor valoración del indicador.

5.3.1.5 *Síntesis del requerimiento medioambiental*

Una vez cuantificados los distintos indicadores medioambientales para cada una de las alternativas propuestas, mediante las ponderaciones de cada uno de los criterios, se obtiene la cuantificación del requerimiento medioambiental de cada pilar. Los resultados finales obtenidos se muestran en la Tabla 5.9.

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL				
Alternativas	Emisiones CO ₂	Consumo hormigón	Consumo acero	VALOR
HA-25 / Vibrado / Sección rectangular (40x40)	0.45	0.55	0.451	0.426
HA-25 / AC / Sección rectangular (40x40)	0.31	0.55	0.451	0.335
HA-50 / Vibrado / Sección rectangular (30x30)	0.52	0.84	0.732	0.602
HA-50 / AC / Sección rectangular (30x30)	0.51	0.84	0.732	0.597
HA-75 / Vibrado / Sección rectangular (25x25)	0.72	1	0.780	0.800
HA-75 / AC / Sección rectangular (25x25)	0.71	1	0.780	0.797
HA-25 / Vibrado / Sección circular (D50)	0.238	0.429	0.649	0.235
HA-25 / AC / Sección circular (D50)	0.089	0.429	0.649	0.136
HA-50 / Vibrado / Sección circular D(35)	0.444	0.809	0.961	0.546
HA-50 / AC / Sección circular (D35)	0.437	0.809	0.961	0.541
HA-75 / Vibrado / Sección circular (D30)	0.616	0.931	0.994	0.715
HA-75 / AC / Sección circular D(30)	0.604	0.931	0.994	0.706

Tabla 5.9 Evaluación medioambiental de las distintas alternativas de pilares

Análisis

Desde el punto de vista de la resistencia característica del hormigón, una resistencia mayor beneficia claramente al medioambiente, debido al ahorro de material y la menor cantidad de emisiones de CO₂ producidas.

Si analizamos el hormigón utilizado según su compactación, un hormigón autocompactante (AC), las consecuencias medioambientales son más perjudiciales en comparación a un hormigón vibrado.

Si diferenciamos de los pilares circulares de los rectangulares, ambientalmente éstos últimos son más beneficiosos que los circulares gracias al ahorro de hormigón.

5.3.2 Indicadores Sociales

A continuación se realiza la cuantificación de los indicadores sociales para las distintas alternativas de pilares. Estos indicadores son: molestias al productor, seguridad del operario, molestias al entorno.

5.3.2.1 *Molestias al productor*

Este indicador valora el ruido al que está expuesto el operario y que se produce debido a la compactación de los pilares. Para la cuantificación de este indicador supondremos tres casuísticas:

1. El ruido durante la compactación es nulo debido a la utilización de un hormigón autocompactante.
2. El vibrador utilizado es un vibrador eléctrico que produce una intensidad de 75dB.
3. El compactador utilizado por el operario es un vibrador neumático que produce una intensidad de 95dB.

Para estas tres casuísticas se obtienen la cuantificación de cada alternativa según el modo de compactación del hormigón.

MOLESTIAS AL PRODUCTOR		
Compactación	Nivel sonoro	Valor
Hormigón autocompactante (AC)	0	1
Vibrador eléctrico	75	0.584
Vibrador neumático	95	0

Tabla 5.10 Valor del indicador molestias al productor según el método de compactación empleado

Análisis

Obviamente un hormigón autocompactante, que no requiere de vibrado, obtiene una valoración mejor que el resto de hormigones al no producir molestias al operario. La fuerte diferencia de valoración entre una alternativa vibrada mediante vibrador eléctrico y un vibrador neumático es debido a la función de valor empleada que penaliza fuertemente a esos niveles sonoros por encima de los 80 dB, límite superior considerado para la salud del trabajador como se ha indicado en el capítulo anterior.

5.3.2.2 Seguridad

El indicador de seguridad es calculado mediante la formulación siguiente:

$$\mathbf{Seguridad} = 0.4 \cdot S_A + 0.6 \cdot C_{tt} \cdot S_{ET}$$

S_A = Seguridad de acceso al puesto de trabajo

S_{ET} = Seguridad de la estancia de trabajo

C_{tt} = Coeficiente del tiempo de trabajo

$$C_{tt} = C_{tc} \cdot C_{tv}$$

C_{tc} = Coeficiente del tiempo de compactación

C_{tv} = Coeficiente del tiempo de vertido del hormigón

$$C_{tv} = C_s \cdot C_H$$

C_s = Coeficiente de sección

C_H = Coeficiente del tipo de hormigón

Fig. 5.1 Formulación para el cálculo de la seguridad del operario.

A continuación se evalúan los distintos coeficientes de la Figura 5.1 para cada una de las alternativas. En las Tablas 5.11 y 5.12 están evaluadas distintas alternativas de pilares tomando como modo de trabajo una torre alrededor del pilar provista de escaleras con barandillas.

SEGURIDAD								
Alternativa	Consistencia	Sección	S_A	C_{tc}	C_s	C_H	S_{ET}	VALOR
HA-25 Vibrado	Líquida	40x40	0.7	0.8	0.5	0.6	1	0.400
	Blanda			0.4				0.327
HA-25 AC	-		0.7	1		1		1
HA-50 Vibrado	Líquida	30x30	0.7	0.8	0.8	0.6	1	0.488
	Blanda			0.4				0.371
HA-50 AC	-		0.7	1		1		1
HA-75 Vibrado	Líquida	25x25	0.7	0.8	1	0.6	1	0.548
	Blanda			0.4				0.400
HA-75 AC	-		0.7	1		1		1

Tabla 5.11 Evaluación del indicador Seguridad para alternativas rectangulares

SEGURIDAD								
Alternativa	Consistencia	Sección	S _A	C _{tc}	C _S	C _H	S _{ET}	VALOR
HA-25 Vibrado HA-25 AC	Líquida	D50	0.7	0.8	0.35	0.6	1	0.356
	Blanda			0.4				0.305
	-		0.7	1		1	1	0.468
HA-50 Vibrado HA-50 AC	Líquida	D35	0.7	0.8	0.7	0.6	1	0.459
	Blanda			0.4				0.356
	-		0.7	1		1	1	0.685
HA-75 Vibrado HA-75 AC	Líquida	D30	0.7	0.8	0.9	0.6	1	0.518
	Blanda			0.4				0.386
	-		0.7	1		1	1	0.811

Tabla 5.12 Evaluación del indicador de Seguridad para alternativas circulares

Análisis

Para la ejecución de pilares, todos ellos mediante la misma plataforma de trabajo y el mismo modo de acceso a ella, se observa que la mediante un hormigón con una resistencia característica mayor es ligeramente más segura que realizarlo con un hormigón convencional. Aunque, gracias a una mayor resistencia no se obtiene una valoración excesivamente buena, la diferencia es debida a la reducción del tiempo de trabajo gracias a la reducción de sección y por lo tanto mayor rapidez de llenado.

La mayor diferencia se produce según si el hormigón necesita vibración para su compactación o no. Un hormigón autocompactante reduce de forma muy importante el tiempo de ejecución y por lo tanto el operario está menos tiempo expuesto a algún tipo de riesgo. Este es el motivo de la mejor valoración que reciben estas alternativas con respecto a la seguridad.

5.3.2.3 Molestias al entorno

Para la evaluación de las molestias al entorno producidas debido a la ejecución de los pilares se tiene en cuenta el ruido emitido, las molestias producidas a los transeúntes i las molestias al tráfico.

En la Tabla 5.13 se muestra la cuantificación del indicador para cada una de las alternativas.

MOLESTIAS AL ENTORNO			
Compactación	Molestias transeúntes	Molestias tráfico	VALOR
Vibrador eléctrico	Nulo	Nulo	0.46
	Alto	Nulo	0.31
	Nulo	Alto	0.31
	Alto	Alto	0.16
Hormigón AC	Nulo	Nulo	1
	Alto	Nulo	0.84
	Nulo	Alto	0.84
	Alto	Alto	0.67

Tabla 5.13 Evaluación del indicador de molestias al entorno

Análisis

En las molestias al entorno no influyen ni la resistencia característica del hormigón utilizado ni la sección considerada. El aspecto importante es la forma con que el productor ejecuta los elementos estructurales, y en mayor importancia, el tipo de compactación utilizada. Para unas mismas afectaciones a los viandantes y al tráfico, un hormigón autocompactante es, en diferencia, la mejor opción posible para reducir el impacto al entorno.

5.3.2.4 Síntesis del requerimiento social

Una vez cuantificadas las distintas alternativas evaluando la influencia de cada una de ellas en la sociedad, mediante las ponderaciones correspondientes, se obtiene la valoración del requerimiento social de cada alternativa. Para las distintas propuestas de pilares se considera:

- Todos ellos serán ejecutados mediante una torre – andamio situado alrededor del pilar provisto de escaleras equipadas con barandillas.
- Se considera que las molestias al tráfico y a los transeúntes durante la ejecución es nula.
- Para la compactación del hormigón de las alternativas que lo requieran, se utilizarán vibradores eléctricos.

Así, en la Tabla 5.14 se puede observar el grado de afectación a la sociedad de cada alternativa, todas ellas en igualdad de condiciones.

EVALUACIÓN SOCIAL						
Alternativa	Consistencia	Sección	Molestias Productor	Seguridad Operario	Molestias Entorno	VALOR
HA-25 Vibrado 40x40	Líquida	40x40	0.58	0.400	0.46	0.436
	Blanda			0.327		0.388
HA-25 AC 40x40	-		1	0.561	1	0.707
HA-50 Vibrado 30x30	Líquida	30x30	0.58	0.488	0.46	0.495
	Blanda			0.371		0.417
HA-50 AC 30x30	-		1	0.748	1	0.832
HA-75 Vibrado 25x25	Líquida	25x25	0.58	0.548	0.46	0.535
	Blanda			0.400		0.436
HA-75 AC 25x25	-		1	0.874	1	0.916
HA-25 Vibrado D50	Líquida	D50	0.58	0.356	0.46	0.407
	Blanda			0.305		0.373
HA-25 AC D50	-	1	0.468	1	0.645	
HA-50 Vibrado D35	Líquida	D35	0.58	0.459	0.46	0.475
	Blanda			0.356		0.407
HA-50 AC D35	-		1	0.685	1	0.790
HA-75 Vibrado D30	Líquida	D30	0.58	0.518	0.46	0.515
	Blanda			0.386		0.426
HA-75 AC D30	-		1	0.811	1	0.874

Tabla 5.14 Evaluación social de las distintas alternativas de pilares

Análisis

Al contrario que ocurría en la evaluación del requerimiento medioambiental, los hormigones autocompactantes son los que marcan la diferencia en el aspecto social. Estos hormigones contribuyen a una mejor percepción de la ejecución de pilares para la sociedad debido a que las molestias producidas y la seguridad se ven recompensadas.

Los hormigones con una resistencia característica mayor también se ven favorecidos en la cuantificación del requerimiento. Esto es debido al menor tiempo de ejecución del pilar, y por lo tanto menor tiempo de riesgo que el operario está expuesto.

5.3.3 Indicadores Económicos

A continuación se realiza la cuantificación de los indicadores económicos para las distintas alternativas de pilares. Estos indicadores son: coste de ejecución, costes de no conformidad, durabilidad y habitabilidad.

5.3.3.1 Coste de ejecución

Para la evaluación de este indicador, en esta tesina, se han tomado como referencia los precios extraídos del software Generador de Precios de CYPE Ingenieros, una herramienta informática que permite obtener precios con previsiones de costes y que incluye un sistema paramétrico, diseñado para acotar las opciones tipológicas, geográficas y económicas que inciden en el coste final de la obra, al tiempo que integra los productos de los principales fabricantes, con todas las opciones para cada uno de ellos. La zona geográfica escogida para la evaluación de las alternativas es la provincia de Barcelona.

La herramienta permite obtener la información de la partida descompuesta que se obtiene tras su acotación paramétrica ofreciendo una descripción de maquinaria, materiales y mano de obra. En el Anejo 3 se detallan los precios utilizados para evaluar las alternativas de pilares según las dimensiones de los elementos estructurales, mano de obra requerida, tipología de encofrados, etc.

A continuación, en las Tablas 5.15 i 5.16 se muestra el coste de ejecución de cada alternativa así como la evaluación del indicador para cada una de ellas.

COSTE DE EJECUCIÓN			
Hormigón	Encofrado	Coste de ejecución (€)	VALOR
HA-25 Vibrado 40x40	Chapas metálicas	238.56	0.900
	Molde desechable de MDF	364.56	0.750
	Molde reutilizable de MDF	466.61	0.616
	Molde reutilizable de plástico	135.47	0.987
HA-25 AC 40x40	Chapas metálicas	248.08	0.890
	Molde desechable de MDF	374.08	0.738
	Molde reutilizable de MDF	476.13	0.603
	Molde reutilizable de plástico	144.99	0.981
HA-50 Vibrado 30x30	Chapas metálicas	333.9	0.789
	Molde desechable de MDF	415.81	0.683
	Molde reutilizable de MDF	-	-
	Molde reutilizable de plástico	122.34	0.993
HA-50 AC 30x30	Chapas metálicas	339.22	0.782
	Molde desechable de MDF	421.13	0.676
	Molde reutilizable de MDF	-	-
	Molde reutilizable de plástico	127.66	0.991
HA-75 Vibrado 25x25	Chapas metálicas	434.59	0.658
	Molde desechable de MDF	458.51	0.627
	Molde reutilizable de MDF	613.58	0.421
	Molde reutilizable de plástico	139.58	0.984
HA-75 AC 25x25	Chapas metálicas	438.25	0.654
	Molde desechable de MDF	462.17	0.622
	Molde reutilizable de MDF	617.24	0.416
	Molde reutilizable de plástico	143.24	0.982

Tabla 5.15 Evaluación del indicador Coste de ejecución para alternativas rectangulares

COSTE DE EJECUCIÓN			
Hormigón	Encofrado	Coste de ejecución (€)	VALOR
HA-25 Vibrado D50	Molde desechable helicoidal	164.42	0.967
	Molde desechable liso	187.53	0.948
	Molde reutilizable de plástico	110.03	0.998
HA-25 AC D50	Molde desechable helicoidal	176.14	0.958
	Molde desechable liso	199.25	0.938
	Molde reutilizable de plástico	121.75	0.994
HA-50 Vibrado D35	Molde desechable helicoidal	148.56	0.979
	Molde desechable liso	184.06	0.952
	Molde reutilizable de plástico	93.24	0.999
HA-50 AC D35	Molde desechable helicoidal	154.33	0.975
	Molde desechable liso	189.83	0.947
	Molde reutilizable de plástico	98.99	0.999
HA-75 Vibrado D30	Molde desechable helicoidal	154.04	0.975
	Molde desechable liso	168.58	0.949
	Molde reutilizable de plástico	85.28	0.996
HA-75 AC D30	Molde desechable helicoidal	158.27	0.972
	Molde desechable liso	190.83	0.946
	Molde reutilizable de plástico	89.53	0.998

Tabla 5.16 Evaluación del indicador Coste de ejecución para alternativas circulares

Análisis

El coste de ejecución depende en mayor medida del encofrado utilizado para la ejecución de los pilares.

En el Anejo 3, con el desglose de precios, se observa que las alternativas con mayor resistencia, aunque el coste del hormigón es más elevado que un hormigón convencional, el ahorro de material les permite que el coste de material por pilar sea inferior. Por el contrario, al tener una sección inferior, la ejecución del pilar es algo más compleja y eleva el coste del pilar, situando su precio por encima de un pilar ejecutado con hormigón convencional.

5.3.3.2 Costes de no conformidad

Para la evaluación de los costes de no conformidad se evalúan los aspectos siguientes:

- Forma de la sección.
- Consistencia del hormigón.
- Nivel del control de ejecución.

En la Tabla 5.17 se evalúan distintas alternativas en función de los parámetros anteriores, independientemente de la resistencia característica del hormigón empleado.

COSTES DE NO CONFORMIDAD					
Alternativa		Consistencia	Control ejecución	VALOR	
RECTANGULAR	Hormigón Vibrado	Seca	Normal	0.459	
		Plástica		0.536	
		Blanda		0.608	
		Fluida		0.677	
		Líquida		0.740	
	Hormigón AC	-		0.723	
	Hormigón Vibrado	Seca	Intenso	0.648	
		Plástica		0.714	
		Blanda		0.775	
		Fluida		0.832	
		Líquida		0.886	
	Hormigón AC	-		0.935	
	CIRCULAR	Hormigón Vibrado	Seca	Normal	0.567
			Plástica		0.638
Blanda			0.704		
Fluida			0.766		
Líquida			0.824		
Hormigón AC		-		0.808	
Hormigón Vibrado		Seca	Intenso	0.70	
		Plástica		0.800	
		Blanda		0.856	
		Fluida		0.907	
		Líquida		0.955	
Hormigón AC		-		1	

Tabla 5.17 Evaluación de los costes de no conformidad para alternativas de sección rectangular

Análisis

Respecto a la sección de la alternativa, si es un factor influyente. Las secciones circulares presentan una mejor valoración que las rectangulares en similares condiciones.

Las soluciones circulares con hormigón autocompactante son las que reciben la mejor valoración debido a la calidad que se consigue gracias a la no necesidad de vibrado. Esta ventaja requiere un nivel de control de ejecución intenso. Por este motivo, las mismas alternativas pero con hormigón vibrado, con consistencias blandas, fluidas o líquidas, consiguen una mejor valoración que esa solución circular, autocompactante, pero con un nivel de control normal.

5.3.3.3 Durabilidad

Para la cuantificación de este indicador se tiene en cuenta el coste de mantenimiento decenal cada alternativa. Esta evaluación se realiza independientemente de si el hormigón es vibrado o autocompactante.

El cálculo de este coste ha sido realizado, al igual que los costes de ejecución, mediante la herramienta Generador de Precios de CYPE Ingenieros.

En las Tablas 5.18 y 5.19 se muestran los costes de mantenimiento decenal de cada alternativa y la valoración del indicador para cada una de ellas.

DURABILIDAD			
Alternativa	Encofrado	Coste de mantenimiento decenal (€)	VALOR
HA-25	Chapas metálicas	17.54	0.784
	Molde desechable de MDF	23.84	0.630
	Molde reutilizable de MDF	28.94	0.494
	Molde reutilizable de plástico	12.39	0.887
HA-50	Chapas metálicas	22.9	0.654
	Molde desechable de MDF	27	0.546
	Molde reutilizable de MDF	-	-
	Molde reutilizable de plástico	12.33	0.888
HA-75	Chapas metálicas	27.31	0.538
	Molde desechable de MDF	28.58	0.504
	Molde reutilizable de MDF	36.31	0.298
	Molde reutilizable de plástico	12.61	0.884

Tabla 5.18 Evaluación del indicador Durabilidad para alternativas rectangulares

DURABILIDAD			
Alternativa	Encofrado	Coste de mantenimiento decenal (€)	VALOR
HA-25	Molde desechable helicoidal	14.09	0.853
	Molde desechable liso	15.72	0.824
	Molde reutilizable de plástico	10.65	0.916
HA-50	Molde desechable helicoidal	13.42	0.869
	Molde desechable liso	15.2	0.835
	Molde reutilizable de plástico	10.66	0.916
HA-75	Molde desechable helicoidal	13.13	0.874
	Molde desechable liso	14.28	0.853
	Molde reutilizable de plástico	10.41	0.919

Tabla 5.19 Valoración del indicador Durabilidad para alternativas circulares

Análisis

Independientemente del encofrado utilizado para la ejecución de las alternativas, existen dos factores determinantes en el coste de mantenimiento decenal, y por lo tanto en el indicador de durabilidad. Estos son, el tamaño de la sección del pilar y la forma de éste.

Las alternativas circulares presentan una durabilidad mejor frente a las rectangulares repercutiendo en unos costes de mantenimiento inferiores.

Es interesante la diferencia de comportamiento de las distintas formas si se varía el tamaño de la sección. Una circular genera menos costes de mantenimiento como más pequeña es la sección. Por lo contrario, las secciones rectangulares presentan un mayor coste de mantenimiento cuanto más pequeña es el área considerada, obteniendo una valoración mejor para las alternativas.

5.3.3.4 Habitabilidad

Para la cuantificación del indicador de habitabilidad se tiene en cuenta el espacio ocupado por el pilar y que no puede ser aprovechado y considerado espacio útil.

Independientemente de la compactación del hormigón, en la Tabla 5.20 se muestra el área ocupada para cada alternativa, así como la cuantificación del indicador.

HABITABILIDAD			
Hormigón	Sección	Ocupación (cm ²)	Valor
HA-25	Rectangular	1600	0.235
HA-50	Rectangular	900	0.686
HA-75	Rectangular	625	1
HA-25	Circular	1963.5	0.07
HA-50	Circular	962.1	0.635
HA-75	Circular	706.85	0.875

Tabla 5.20 Valoración del indicador de habitabilidad

Análisis

Como se puede observar, los hormigones con una resistencia característica mayor permiten un ahorro de sección y facilitan que ese espacio pueda ser destinado a aumentar el espacio habitable del edificio, consiguiendo así una mejor valoración del indicador.

Si se analiza la habitabilidad según la forma de los pilares, se observa que las secciones circulares ocupan un mayor espacio que las rectangulares, utilizando el mismo tipo de hormigón. Por este motivo, estas alternativas reciben una cualificación del indicador menor que las rectangulares, siendo el resto de características idénticas.

5.3.3.5 Síntesis del requerimiento económico

Considerando que todas las alternativas se ejecutan mediante encofrado de placas metálicas para las secciones rectangulares. Las secciones circulares se considera que han sido ejecutadas mediante un molde desechable helicoidal.

Análisis

Analizando la Tabla 5.21, donde se muestran los resultados de la evaluación económica de las distintas alternativas, se concluye que las alternativas circulares son económicamente preferibles a las secciones rectangulares. Esto es debido a que las primeras alcanzan un mejor índice para el requerimiento económico en todas sus alternativas.

Las secciones circulares y rectangulares presentan un comportamiento diferente a destacar. Las secciones circulares presentan una mejor valoración económica para hormigones con una alta resistencia característica. Por lo contrario, las secciones rectangulares alcanzan un mejor índice con una resistencia característica convencional.

Respecto a la compactación del hormigón, un hormigón autocompactante en la mayor parte de los casos es la opción económica mejor valorada en comparación con alternativas de la misma resistencia característica, mismo nivel de control, que requieren ser vibradas.

EVALUACIÓN ECONÓMICA							
PILARES RECTANGULARES							
Alternativa	Consistencia del hormigón	Control ejecución	Coste de ejecución	Coste de no conformidad	Durabilidad	Habitabilidad	VALOR
HA-25	Blanda	Normal	0.900	0.608	0.784	0.235	0.759
	Líquida	Normal	0.900	0.740	0.784	0.235	0.772
	Blanda	Intenso	0.900	0.775	0.784	0.235	0.776
	Líquida	Intenso	0.900	0.886	0.784	0.235	0.787
HA-25 AC	-	Normal	0.890	0.723	0.784	0.235	0.765
		Intenso	0.890	0.935	0.784	0.235	0.786
HA-50	Blanda	Normal	0.789	0.608	0.655	0.686	0.730
	Líquida	Normal	0.789	0.740	0.655	0.686	0.744
	Blanda	Intenso	0.789	0.775	0.655	0.686	0.747
	Líquida	Intenso	0.789	0.886	0.655	0.686	0.758
HA-50 AC	-	Normal	0.782	0.723	0.655	0.686	0.738
		Intenso	0.782	0.935	0.655	0.686	0.759
HA-75	Blanda	Normal	0.658	0.608	0.538	1	0.675
	Líquida	Normal	0.658	0.740	0.538	1	0.688
	Blanda	Intenso	0.658	0.775	0.538	1	0.691
	Líquida	Intenso	0.658	0.886	0.538	1	0.702
HA-75 AC	-	Normal	0.654	0.723	0.538	1	0.684
		Intenso	0.654	0.935	0.538	1	0.705
PILARES CIRCULARES							
Alternativa	Consistencia del hormigón	Control ejecución	Coste de ejecución	Coste de no conformidad	Durabilidad	Habitabilidad	VALOR
HA-25	Blanda	Normal	0.967	0.704	0.856	0.066	0.798
	Líquida	Normal	0.967	0.824	0.856	0.066	0.810
	Blanda	Intenso	0.967	0.856	0.856	0.066	0.814
	Líquida	Intenso	0.967	0.955	0.856	0.066	0.823
HA-25 AC	-	Normal	0.958	0.808	0.856	0.066	0.804
		Intenso	0.958	1	0.856	0.066	0.823
HA-50	Blanda	Normal	0.979	0.704	0.869	0.635	0.884
	Líquida	Normal	0.979	0.824	0.869	0.635	0.896
	Blanda	Intenso	0.979	0.856	0.869	0.635	0.899
	Líquida	Intenso	0.979	0.955	0.869	0.635	0.909
HA-50 AC	-	Normal	0.975	0.808	0.869	0.635	0.892
		Intenso	0.975	1	0.869	0.635	0.911
HA-75	Blanda	Normal	0.975	0.704	0.874	0.875	0.914
	Líquida	Normal	0.975	0.824	0.874	0.875	0.926
	Blanda	Intenso	0.975	0.856	0.874	0.875	0.930
	Líquida	Intenso	0.975	0.955	0.874	0.875	0.939
HA-75 AC	-	Normal	0.972	0.808	0.874	0.875	0.923
		Intenso	0.972	1	0.874	0.875	0.942

Tabla 5.21 Evaluación económica de distintas alternativas de pilares

5.4 ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD

Este apartado, después de haber cuantificado los indicadores de las distintas alternativas, pretende realizar la cuantificación final de las distintas alternativas. Mediante las ponderaciones correspondientes de cada uno de los requerimientos sostenibles, que han sido cuantificados en el apartado anterior, es posible encontrar un índice de sostenibilidad para cada pilar. Este índice refleja el grado de sostenibilidad de cada una de las alternativas considerada, es decir, el equilibrio medioambiental, económico y social de cada solución de pilar.

En la Tabla 5.22 se muestra la ponderación, de los tres ejes de la sostenibilidad, considerada en esta herramienta.

SOSTENIBILIDAD	
Medioambiente	33 %
Sociedad	17 %
Economía	50 %

Tabla 5.22 Ponderación de los requerimientos sostenibles

Las alternativas consideradas en este caso se caracterizan por:

- Todas las alternativas rectangulares serán ejecutadas mediante encofrados de placas metálicas.
- Todas las alternativas circulares serán ejecutadas mediante un molde de desechable helicoidal.
- Las alternativas que en su ejecución requieren de vibrado, utilizarán un vibrador eléctrico, emitiendo 75 dB y considerado un nivel medio en el indicador de molestias al entorno.
- Todas las alternativas serán ejecutadas de forma que la afectación al tráfico y a los transeúntes se considera nula.
- La ejecución de las alternativas se realizará mediante una torre-andamio provista de escaleras y barandillas. La subida a la plataforma de trabajo se realizará mediante las escaleras provistas de barandillas.

Teniendo en cuenta las anteriores especificaciones, en la Tabla 5.20 se muestra la valoración ambiental de las posibles alternativas a ejecutar.

EVALUACIÓN SOSTENIBLE							
SECCIÓN RECTANGULAR							
Hormigón	Compactación	Consistencia	Nivel de control	Medioambiente	Sociedad	Economía	ÍNDICE
HA-25	Vibrado	Blanda	Normal	0.426	0.388	0.759	0.586
		Líquida	Normal	0.426	0.436	0.772	0.601
		Blanda	Intenso	0.426	0.388	0.776	0.595
		Líquida	Intenso	0.426	0.436	0.787	0.608
HA-25	AC	-	Normal	0.335	0.707	0.765	0.612
			Intenso	0.335	0.707	0.786	0.623
HA-50	Vibrado	Blanda	Normal	0.602	0.417	0.730	0.635
		Líquida	Normal	0.602	0.495	0.744	0.655
		Blanda	Intenso	0.602	0.417	0.747	0.644
		Líquida	Intenso	0.602	0.495	0.758	0.662
HA-50	AC	-	Normal	0.597	0.832	0.738	0.707
			Intenso	0.597	0.832	0.759	0.717
HA-75	Vibrado	Blanda	Normal	0.800	0.436	0.675	0.677
		Líquida	Normal	0.800	0.535	0.688	0.700
		Blanda	Intenso	0.800	0.436	0.691	0.685
		Líquida	Intenso	0.800	0.535	0.702	0.707
HA-75	AC	-	Normal	0.797	0.916	0.684	0.760
			Intenso	0.797	0.916	0.705	0.771
SECCIÓN CIRCULAR							
Hormigón	Compactación	Consistencia	Nivel de control	Medioambiente	Sociedad	Economía	ÍNDICE
HA-25	Vibrado	Blanda	Normal	0.235	0.373	0.798	0.540
		Líquida	Normal	0.235	0.407	0.810	0.551
		Blanda	Intenso	0.235	0.373	0.814	0.548
		Líquida	Intenso	0.235	0.407	0.823	0.558
HA-25	AC	-	Normal	0.136	0.645	0.804	0.555
			Intenso	0.136	0.645	0.823	0.564
HA-50	Vibrado	Blanda	Normal	0.546	0.407	0.884	0.692
		Líquida	Normal	0.546	0.475	0.896	0.709
		Blanda	Intenso	0.546	0.407	0.899	0.699
		Líquida	Intenso	0.546	0.475	0.909	0.716
HA-50	AC	-	Normal	0.541	0.790	0.892	0.758
			Intenso	0.541	0.790	0.911	0.768
HA-75	Vibrado	Blanda	Normal	0.715	0.426	0.914	0.766
		Líquida	Normal	0.715	0.515	0.926	0.787
		Blanda	Intenso	0.715	0.426	0.930	0.774
		Líquida	Intenso	0.715	0.515	0.939	0.794
HA-75	AC	-	Normal	0.706	0.874	0.923	0.843
			Intenso	0.706	0.874	0.942	0.852

Tabla 5.23 Valoración ambiental de distintas alternativas de pilares

Análisis

A continuación se muestran los resultados separados por sección y con las alternativas ordenadas según la valoración obtenida.

ALTERNATIVAS RECTANGULARES				
HORMIGÓN	COMPACTACIÓN	CONSISTENCIA	NIVEL DE CONTROL	ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD
HA-75	AC	-	Intenso	0,771
HA-75	AC	-	Normal	0,760
HA-50	AC	-	Intenso	0,717
HA-75	Vibrado	Líquida	Intenso	0,707
HA-50	AC	-	Normal	0,707
HA-75	Vibrado	Líquida	Normal	0,700
HA-75	Vibrado	Blanda	Intenso	0,685
HA-75	Vibrado	Blanda	Normal	0,677
HA-50	Vibrado	Líquida	Intenso	0,662
HA-50	Vibrado	Líquida	Normal	0,655
HA-50	Vibrado	Blanda	Intenso	0,644
HA-50	Vibrado	Blanda	Normal	0,635
HA-25	AC	-	Intenso	0,623
HA-25	AC	-	Normal	0,612
HA-25	Vibrado	Líquida	Intenso	0,608
HA-25	Vibrado	Líquida	Normal	0,601
HA-25	Vibrado	Blanda	Intenso	0,595
HA-25	Vibrado	Blanda	Normal	0,586

Tabla 5.24 Valoración sostenible para alternativas rectangulares

En la tabla 5.21 se observan los valores finales del análisis medioambiental para las alternativas de pilar rectangulares.

La primera conclusión que se extrae, es que los hormigones con una resistencia característica mayor, por lo general, permiten la obtención de soluciones rectangulares más sostenibles.

También se concluye que un hormigón autocompactante es más sostenible que un hormigón vibrado, considerándolos con la misma resistencia característica. Cabe destacar la solución que resulta para el HA-50 Autocompactante i con un nivel de control de ejecución intenso, cuyo índice de sostenibilidad es superior a hormigones con resistencia característica mayor que requieren ser vibrados.

Respecto a las alternativas circulares, en la Tabla 5.22 se muestran ordenadas según la valoración sostenible obtenida.

ALTERNATIVAS CIRCULARES				
HORMIGÓN	COMPACTACIÓN	CONSISTENCIA	NIVEL DE CONTROL	ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD
HA-75	AC	-	Intenso	0,852
HA-75	AC	-	Normal	0,843
HA-75	Vibrado	Líquida	Intenso	0,794
HA-75	Vibrado	Líquida	Normal	0,787
HA-75	Vibrado	Blanda	Intenso	0,774
HA-50	AC	-	Intenso	0,768
HA-75	Vibrado	Blanda	Normal	0,766
HA-50	AC	-	Normal	0,758
HA-50	Vibrado	Líquida	Intenso	0,716
HA-50	Vibrado	Líquida	Normal	0,709
HA-50	Vibrado	Blanda	Intenso	0,699
HA-50	Vibrado	Blanda	Normal	0,692
HA-25	AC	-	Intenso	0,564
HA-25	Vibrado	Líquida	Intenso	0,558
HA-25	AC	-	Normal	0,555
HA-25	Vibrado	Líquida	Normal	0,551
HA-25	Vibrado	Blanda	Intenso	0,548
HA-25	Vibrado	Blanda	Normal	0,540

Tabla 5.25 Valoración sostenible para alternativas circulares

Analizando los resultados se puede observar que la ordenación es relativamente parecida a la ordenación para las alternativas rectangulares. Los únicos cambios se presentan en los hormigones autocompactantes que pierden algunas posiciones en el caso de las alternativas circulares.

El resultado final obtenido es que los hormigones con una resistencia característica mayor son más sostenibles. Con diferencia, éstos son valorados con un mayor índice.

Los hormigones autocompactantes también terminan resultando más sostenibles que los hormigones que requieren de vibrado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

En esta tesina se ha desarrollado una metodología y herramienta para la discriminación entre diferentes alternativas de pilares de edificación mediante un “índice de sostenibilidad”. Este valor final está basado en el análisis multicriterio para la toma de decisión que da un soporte riguroso a la metodología establecida.

Este capítulo tiene por objetivo; por un lado presentar las conclusiones generales de este trabajo de investigación y por otro, exponer futuras líneas de estudio en las que poder continuar el camino emprendido.

En primer lugar, en este capítulo se presentan las conclusiones generales respecto a los objetivos iniciales propuestos. Seguidamente, se explican las conclusiones específicas obtenidas por cada capítulo y, finalmente, se presentan distintas sugerencias respecto a las futuras líneas de investigación.

6.2 CONCLUSIONES GENERALES

Al finalizar la presente tesina cabe afirmar que tanto el objetivo general como los objetivos específicos expuestos en el primer capítulo se han cumplido de forma muy favorable.

En primer lugar, en el estado del conocimiento se hizo una revisión a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible aplicado al sector de la construcción, estudiando los efectos y las responsabilidades de los distintos agentes implicados en el sector. A continuación se realizó un breve repaso al análisis de decisiones multicriterio, las metodologías existentes, como también, algunas de las herramientas existentes para la evaluación sostenible.

Seguidamente, se desarrolló una metodología para seleccionar la alternativa de pilares más eficiente desde el punto de vista de la sostenibilidad. La metodología se basó en un modelo jerárquico de tres niveles: requerimientos, criterios e indicadores. Este proceso permitió estructurar el problema de forma coherente y ordenada facilitando el análisis de las distintas alternativas de pilares. Mediante un análisis de valor, donde cada indicador tenía una función de valor asociada, se llegó a obtener un “índice de sostenibilidad” para las distintas soluciones que se quisieran analizar.

Posteriormente se realizó una selección de parámetros para distinguir entre distintas alternativas de pilares. Estas pues, se diferenciaban según la sección, la resistencia característica del hormigón empleado y el modo de compactación del hormigón (hormigón vibrado u hormigón autocompactante). Las distintas alternativas fueron evaluadas según la herramienta que se había desarrollado alcanzando las conclusiones que se detallan en los subapartados siguientes.

6.2.1 Conclusiones medioambientales

Medioambientalmente podemos distinguir diferencias según los tres parámetros que diferencian las alternativas analizadas.

Primeramente, se puede observar que las pilares ejecutados mediante hormigones con una resistencia característica mayor son las más ventajosas para el medioambiente. Esto es debido a las características mecánicas de los hormigones de alta resistencia que permiten un ahorro importante de sección, traduciéndose en una disminución significativa de material empleado y emisiones de CO₂ producidas.

Si se analizan las alternativas según su sección, se comprueba que las rectangulares son ambientalmente más favorables que las circulares, como consecuencia de su mayor consumo de material para un mismo tipo de hormigón.

Finalmente, un hormigón autocompactante termina siendo ligeramente más desfavorable que un hormigón convencional ya que no permite ningún ahorro de materiales y en cambio produce unas emisiones de CO₂ superiores.

En conclusión, la alternativa medioambientalmente más eficiente es un pilar ejecutado con un hormigón HA-75, de sección rectangular (25x25 cm²) y compactado mediante vibrador.

6.2.2 Conclusiones sociales

Socialmente también se pueden extraer distintas conclusiones según los tres parámetros que diferencian las alternativas.

El parámetro más influyente en este sentido es el tipo de compactación del hormigón. Del resultado final se concluye que un hormigón autocompactante permite la eliminación del ruido producido por los vibradores durante el proceso de compactación. De esta forma se reducen de forma muy importante las molestias al entorno así como las molestias al ruido a las que está sometido el trabajador.

Se observan diferencias también según la resistencia característica del hormigón y el tipo de sección empleada. Estas diferencias no son tan significativas como la compactación del

hormigón pero benefician a aquellos pilares rectangulares con hormigones de mayor resistencia. Estos pilares emplean menos material, permitiendo un tiempo de ejecución menor y por lo tanto, mejoran la seguridad del trabajador.

En conclusión, se identifica como la alternativa socialmente más eficiente un pilar ejecutado con un hormigón HA-75 autocompactante y de sección rectangular (25x25 cm²).

6.2.3 Conclusiones económicas

Económicamente, se distingue distintos comportamientos según la sección utilizada para la ejecución de los pilares. Estrictamente diferenciando las alternativas por su sección, y manteniendo el resto de parámetros en común, se observa que las secciones circulares son económicamente mejores con hormigones de alta resistencia. Por lo contrario, las secciones rectangulares son económicamente más eficientes si son ejecutadas con hormigones convencionales. Se remarca este hecho, y no que las circulares sean mejor que las rectangulares debido a que el coste de ejecución es significativamente diferente porque se ejecutan de distinta forma (distinto encofrado).

Los hormigones con una resistencia característica mejor permiten un ahorro de espacio que ayuda a mejorar la habitabilidad del edificio. Por lo contrario, el coste decenal de mantenimiento es mayor. El coste inicial de ejecución, para las secciones rectangulares es mayor para hormigones de alta resistencia, siendo las alternativas convencionales económicamente más asequibles. Para secciones circulares, la diferencia de coste entre diferentes resistencias no es tan significativa, siendo la opción más rentable un HA-50.

Económicamente, las soluciones autocompactantes con un control de ejecución intenso son las más eficientes. Así pues, la alternativa mejor valorada según este requerimiento se trata de un pilar ejecutado con un hormigón HA-75 autocompactante y de sección circular ($\phi 30$) o un pilar rectangular ejecutado con un HA-75 líquido o autocompactante.

6.2.4 Conclusiones sostenibles

Una vez realizadas las valoraciones de los tres requerimientos sostenibles, se realizó mediante los correspondientes pesos, la evaluación global de todas las alternativas obteniendo para cada una de ellas un índice de sostenibilidad.

Una vez cuantificada cada una de las alternativas, se pudo observar que los pilares circulares obtuvieron un índice mayor que las rectangulares.

Diferenciando las alternativas por la resistencia característica del hormigón empleado, se comprueba que cuanto mayor es esta, más sostenible es el pilar. Al igual sucede con la compactación del hormigón. Para la mayoría de las resistencias, un hormigón autocompactante es más sostenible que cualquier hormigón de la misma resistencia pero que requiere ser vibrado.

Finalmente se concluyó que las tres alternativas más sostenibles para cada una de las secciones utilizadas son las que se muestran en la Tabla 6.1.

ALTERNATIVAS MÁS SOSTENIBLES			
SECCIÓN RECTANGULAR		SECCIÓN CIRCULAR	
Hormigón	Índice	Hormigón	Índice
HA-75 AC	0.771	HA-75 AC	0.852
HA-50 (control intenso)	0.717	HA-75 Vibrat	0.794
HA-75 Vibrado (consistencia líquida)	0.707	HA-50 AC (control intenso)	0.768

Tabla 6.1 Alternativas más sostenibles

Las tres alternativas menos sostenibles en la evaluación realizada concluyeron ser:

ALTERNATIVAS MENOS SOSTENIBLES			
SECCIÓN RECTANGULAR		SECCIÓN CIRCULAR	
Hormigón	Índice	Hormigón	Índice
HA-25 AC	0.623	HA-25 Vibrado	0.558
HA-25 Vibrado (consistencia líquida)	0.608	HA-25 AC (control normal)	0.555
HA-25 Vibrado (consistencia blanda)	0.601	HA-25 Vibrado (consistencia blanda)	0.548

Tabla 6.2 Alternativas menos sostenibles

6.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

6.3.1 Conclusiones acerca del estado del conocimiento

En el estado del conocimiento, se hizo un repaso a los conceptos de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible centrado en el sector de la construcción, alcanzando las conclusiones siguientes:

- El sector de la construcción, uno de los más importantes de un país, es uno de los mayores consumidores de recursos naturales y generador de impactos ambientales.
- Un sistema económico basado en la máximo producción, el consumo, la explotación ilimitada de recursos y el beneficio como único criterio a tener en cuenta es insostenible. Se debe implantar un sistema que mejore las condiciones

de vida, compatible con una explotación racional y que cuide el medioambiente. En definitiva, un equilibrio entre los tres pilares de la sostenibilidad: economía, medioambiente y sociedad.

- La construcción sostenible es un proceso complejo donde se relacionan numerosos agentes cuya actuación puede ser valorada desde el punto de vista de la sostenibilidad. La construcción sostenible necesita la implicación de todos los agentes para que se cumplan los objetivos y al final, obtener productos urbanos eficientes y respetuosos con el medioambiente y la sociedad. Para tal fin es necesario un trabajo coordinado.

También se realizó un análisis acerca de las metodologías y herramientas existentes en torno a la toma de decisión mediante el entorno sostenible, llegando a las siguientes conclusiones:

- No existe ninguna metodología que evalúe diferentes alternativas y guie al decisor en el análisis y solución de problemas en el entorno sostenible para la ejecución de pilares de edificación.
- Las herramientas realizan un análisis sostenible de todo un proyecto, tomando como sistema de estudio el edificio en su totalidad. No existe ninguna herramienta que realice el análisis de sostenibilidad centrado solamente en unidades de obra por separado.
- La mayor parte de las herramientas se centran, fundamentalmente, en la vertiente medioambiental, habiendo pocas referencias a asuntos sociales, funcionales, etc.

6.3.2 Conclusiones acerca del análisis del método

De este capítulo se concluye que la estructura de la metodología desarrollada cuenta con gran rigor científico por la lógica con que se desarrolla y por la utilización de técnicas existentes.

- La decisión del estudio se enfatiza tan solo en los pilares de edificación, tomando estos como sistema de referencia del análisis a realizar.
- La metodología se basa en un modelo jerárquico que engloba tres requerimientos o pilares fundamentales: medioambiente, sociedad y economía. Mediante estos tres ejes se construye el árbol de valores del modelo.
- Se caracterizaron e identificaron las variables que influyen en la toma de decisión de la ejecución de pilares, obteniendo el árbol de valores definitivo.
- Para el proceso de evaluación se describen las distintas etapas necesarias: ponderación de pesos, construcción de la función de valor, cálculo del valor de las alternativas y el cálculo de la alternativa óptima.
- La ponderación se realiza mediante la celebración de un seminario y la participación de distintas personalidades relacionadas en distintos ámbitos del sector de la construcción. Esta ponderación se realiza mediante una asignación directa realizada por los participantes del seminario.
- La normalización de las distintas variables analizadas por los indicadores se realiza mediante la función de valor utilizada por la herramienta MIVES.

- La estructura del árbol de requerimientos, la ponderación realizada y la construcción de la función de valor para transformar las unidades permite evaluar las alternativas más rigurosamente.

6.3.3 Conclusiones acerca de los indicadores y funciones de valor

De este capítulo se resumen las conclusiones específicas que a continuación se argumentan:

- Se expusieron todas las variables que influyen en la toma de decisión para la ejecución de pilares de edificación.
- Se definieron los indicadores y sus funciones de valor para la cuantificación de las distintas alternativas de pilares.

6.3.4 Conclusiones acerca de la evaluación de alternativas y resultados

En el capítulo 5 se definieron detalladamente los parámetros que definían las distintas alternativas que se querían estudiar, como por ejemplo las dosificaciones de sus hormigones, secciones, resistencias características, etc. De este capítulo, después de realizar el análisis de las distintas alternativas, se concluyó lo siguiente:

- Las alternativas más sostenibles resultaron ser las ejecutadas utilizando un hormigón HA-75 autocompactante con secciones circular o rectangular, siendo la primera más sostenible que la rectangular.
- Las alternativas menos sostenibles resultaron ser las ejecutadas mediante un hormigón HA-25, vibrado y con secciones rectangulares o circulares, siendo estas últimas menos sostenibles que las rectangulares.
- De estos resultados obtenidos cabe destacar que los resultados no son absolutos, es decir, se puede obtener que una alternativa es mejor que otra pero se debe tener presente el carácter relativo de los resultados debido a la valoración de algunos parámetros de forma cualitativa.

6.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En la tesina se ha desarrollado una metodología y una herramienta para evaluar, mediante criterios sostenibles, pilares de edificación convencional. Dados los resultados obtenidos y las perspectivas creadas desde esta línea de investigación sería conveniente:

- Mejorar la primera aproximación que ha sido desarrollada para hacer más precisos los resultados. Por ejemplo, en el indicador de molestias al productor no han sido incluidas las vibraciones a las que está sometido el operario al compactar

el hormigón. Éste, y otros indicadores pueden refinarse para mejorar la precisión del método desarrollado.

- Desarrollar el método incorporando la influencia del ciclo de vida de los pilares en la evaluación sostenible de éstos.
- Aplicación del análisis de valor a otras unidades de obra de un edificio, por ejemplo los forjados.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Alavedra, P.; Domínguez, J.; Serra J. (1998). **La construcción sostenible. El estado de la cuestión.** Habitat, boletín.4. Informes técnicos de la construcción. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.

Romero, C. (1992). **Teoría de la decisión multicriterio. Conceptos, técnicas y aplicaciones.** Alianza, España.

Cañabate, A. (1997). **Toma de decisiones. Análisis y entorno organizativo.** Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.

Lippiatt, B. (1999). **Selecting Cost - Effective Green Building Products:BEES Approach.** Journal of construction engineering and management.. vol 125 (6), pp 448 - 455.

Casado, N. (1996). Edificios de alta calidad ambiental (Ibérica, alta tecnología. ISSN 0.211-0776).

Blanca, D. (2001). **Estudio de la aplicabilidad de los métodos de toma de decisión en el diseño constructivo.** Tesina de especialidad. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politècnica de Catalunya. Directores de tesis: Aguado de Cea Antonio, Ormazabal Gaizka.

Alarcón Núñez, B. (2005). **Modelo integrado de valor para estructuras sostenibles.** Tesis doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politècnica de Catalunya. Director de tesis: Aguado de Cea, Antonio.

Manga Conte, R. (2005). **Una nueva metodología para la toma de decisión en la gestión de la contratación de proyectos constructivos**. Tesis doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Directores de tesis: Aguado de Cea Antonio, Ormazabal Gaizka.

Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) (1999). **Guía de la edificación sostenible. Calidad energética y Medioambiental en Edificación**. Ministerio de fomento, Instituto Cerdá.

Lopez, V. (2001). **Desarrollo sostenible. Aproximación conceptual y operativa de los principios de Sostenibilidad al Sector de la Construcción**. Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería de la construcción. Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Alavedra, P.

Casanovas Rubio, Maria del Mar (2009). **Optimización global del procedimiento constructivo de grandes viaductos: impacto ambiental, coste, plazo y seguridad laboral**. Tesis doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politecnica de Cataluña. Director de tesis: Dr. Gonzalo Ramos Schneider.

Cheuk Fan, Ng (2000). **Effects of building construction noise on residents: a quasi-experiment**. Journal of Environmental Psychology 20, pp375-385

Diagnóstico Técnico Cuantitativo. Auditoría de Sostenibilidad del Territorio de Actuación del Grupo de Acción Local Dulcinea, para el desarrollo de la Agenda 21 Local en el marco de la Red de Ciudades y Pueblos Sostenibles de Castilla-La Mancha . Capítulo III.

Soria López, Francisco Javier. **Arquitectura y naturaleza a finales del siglo XX 1980-2000. Una aproximación dialógica para el diseño sostenible en arquitectura**. Tesis doctoral. Departamento de proyectos arquitectónicos. Universidad Politécnica de Cataluña. Director de la tesis: Domínguez, Luis Ángel

Pere Alavedra, Dr. Ing. Industrial (UPC); Javier Domínguez, Dr. Ing. Industrial (UZ); Engracia Gonzalo, Ing. Industrial (UPC) y Javier Serra, Arquitecto (Ministerio de Fomento). **La construcción sostenible. el estado de la cuestión**. Informes de la Construcción. Vol. 49, nº 451, septiembre/Octubre 1997

Michael J. Gibbs, Peter Soyka and David Conneely (ICF Incorporated). **CO2 Emissions from Cement Production**. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories

Nathan Martin, Ernst Worrell, Lynn Price. Environmental Energy Technologies Division. **Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry**. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (1999).

EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Secretaría general técnica. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.

REAL DECRETO 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido. BOE nº 60 11-03-2006.

Hormigón autocompactante. BASF Construction Chemicals España, S.L. Admixture Systems.

REFERENCIAS OBTENIDAS DE INTERNET

<http://www.seguridadenlaconstruccion.es/>

http://www.urbar.com/es/v_externos/e_hormigon.htm

<http://www.generadordeprecios.info>

<http://www.hormigon-altas-prestaciones.com/home>

http://www.lemona.biz/SEGURIDAD%20LABORAL-2/riesgos_enfermedades.pdf

<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/001048.htm>

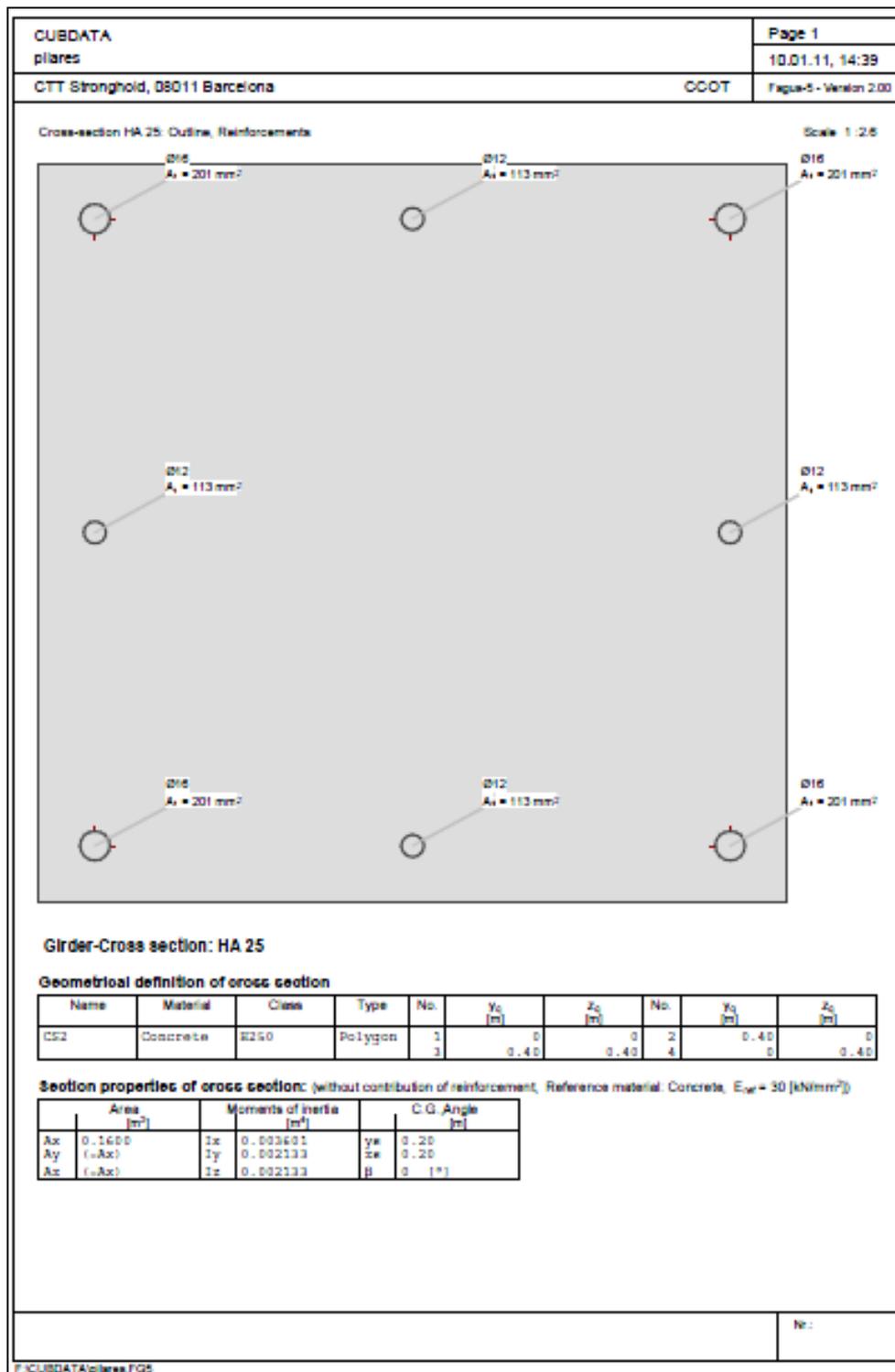
<http://www.mpasesorias.cl/Files/CostosCalidad2.pdf>

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/8/55868-8.pdf>

<http://thefxmedia.com/reciclar-del-acero.html>

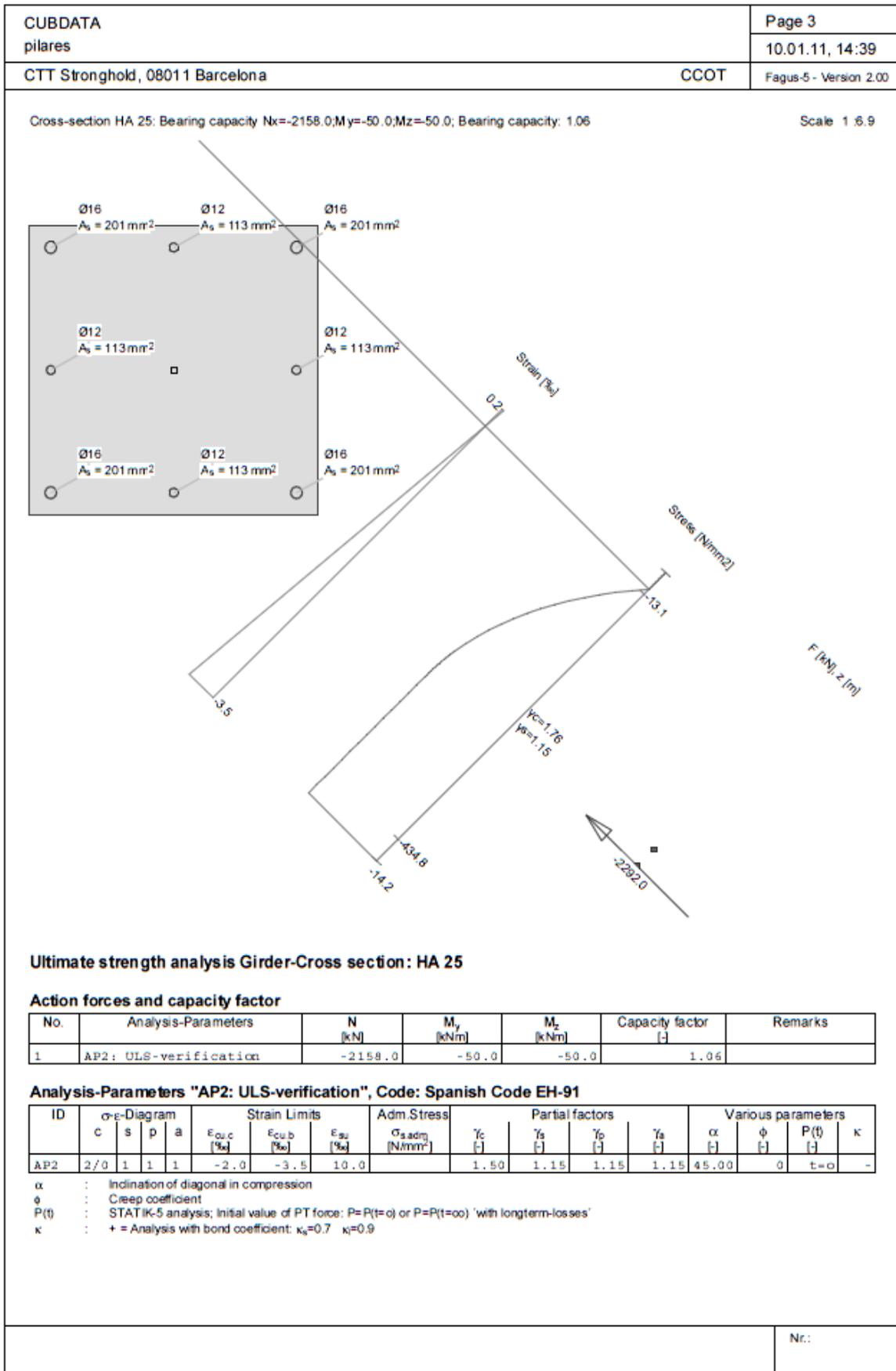
ANEJO 1

DIMENSIONAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS



CUBDATA pilares						Page 2 10.01.11, 14:39										
CTT Stronghold, 08011 Barcelona						CCOT Fagus-5 - Version 2.00										
Mass: Details of CS elements																
CS element	A_{s+} [m ²]	minus		A_{s-} [m ²]	A_{s0} [m ²]	γ_s [1/m ³]	M_s [kg/m]									
CS2	0.1600				0.1600	2.5	400.0									
Longit. reinf. Girder-Cross section: HA 25																
Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1257 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.8 \%$																
Name	Material	Class	BC	Type	y_{1e} [m]	z_{1e} [m]	y_{2e} [m]	z_{2e} [m]	A_{s0} [mm ²]							
PR1	Reinf. steel	AEB500	2	PL	0.03	0.37			1 ϕ 16=201							
PR12				PL	0.20	0.37			1 ϕ 12=113							
PR4				PL	0.37	0.37			1 ϕ 16=201							
PR10				PL	0.03	0.20			1 ϕ 12=113							
PR11				PL	0.37	0.20			1 ϕ 12=113							
PR2				PL	0.03	0.03			1 ϕ 16=201							
PR9				PL	0.20	0.03			1 ϕ 12=113							
PR3				PL	0.37	0.03			1 ϕ 16=201							
BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone Type : Definition of reinforcement: P = Point, L = Line, R = Ring																
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 25																
Action forces and capacity factor																
No.	Analysis-Parameters	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	Capacity factor [-]	Remarks										
1	AP2: ULS-verification	-2158.0	-50.0	-50.0	1.06											
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91																
ID	σ - ϵ -Diagram				Strain Limits			Adm.Stress	Partial factors				Various parameters			
	c	s	p	a	$\epsilon_{cu,c}$ [‰]	$\epsilon_{cu,b}$ [‰]	ϵ_{su} [‰]	$\sigma_{s,adm}$ [N/mm ²]	γ_c [-]	γ_s [-]	γ_p [-]	γ_a [-]	α [-]	ϕ [-]	P(t) [-]	κ
AP2	2/0	1	1	1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=c	-
α : Inclination of diagonal in compression ϕ : Creep coefficient P(t) : STATIK-5 analysis; Initial value of PT force: P=P(t=0) or P=P(t=∞) 'with longterm-losses' κ : + = Analysis with bond coefficient: $\kappa_s=0.7$ $\kappa_t=0.9$																
Extreme stresses and strain																
Name	Class		y_0 [m]	z_0 [m]	ϵ [‰]	σ_0 [N/mm ²]	γ [-]									
CS2	H250		-0.00	-0.00	-3.5	-14.2	1.76									
CS2	H250		0.40	0.40	0.2	0	1.76									
PR2	AEB500		0.03	0.03	-3.2	-434.8	1.15									
PR4	AEB500		0.37	0.37	-0.1	-13.1	1.15									
							Nr.:									

F:\CUBDATA\Pilares FGS



CUBDATA						Page 4	
pilares						10.01.11, 14:39	
CTT Stronghold, 08011 Barcelona						CCOT	Fagus-5 - Version 2.00
Extreme stresses and strain							
Name	Class	y_c [m]	z_c [m]	ϵ [‰]	σ_d [N/mm ²]	γ [-]	
CS2	H250	-0.00	-0.00	-3.5	-14.2	1.76	
CS2	H250	0.40	0.40	0.2	0	1.76	
PR2	AEH500	0.03	0.03	-3.2	-434.8	1.15	
PR4	AEH500	0.37	0.37	-0.1	-13.1	1.15	
						Nr:	

F:\CUBDATA\pilares.FG5

CUBDATA pilares	Page 5 10.01.11, 14:51
CTT Stronghold, 08011 Barcelona	CCOT Fagus-5 - Version 2.00

Cross-section HA 50: Outline, Reinforcements Scale 1:1.9

Girder-Cross section: HA 50

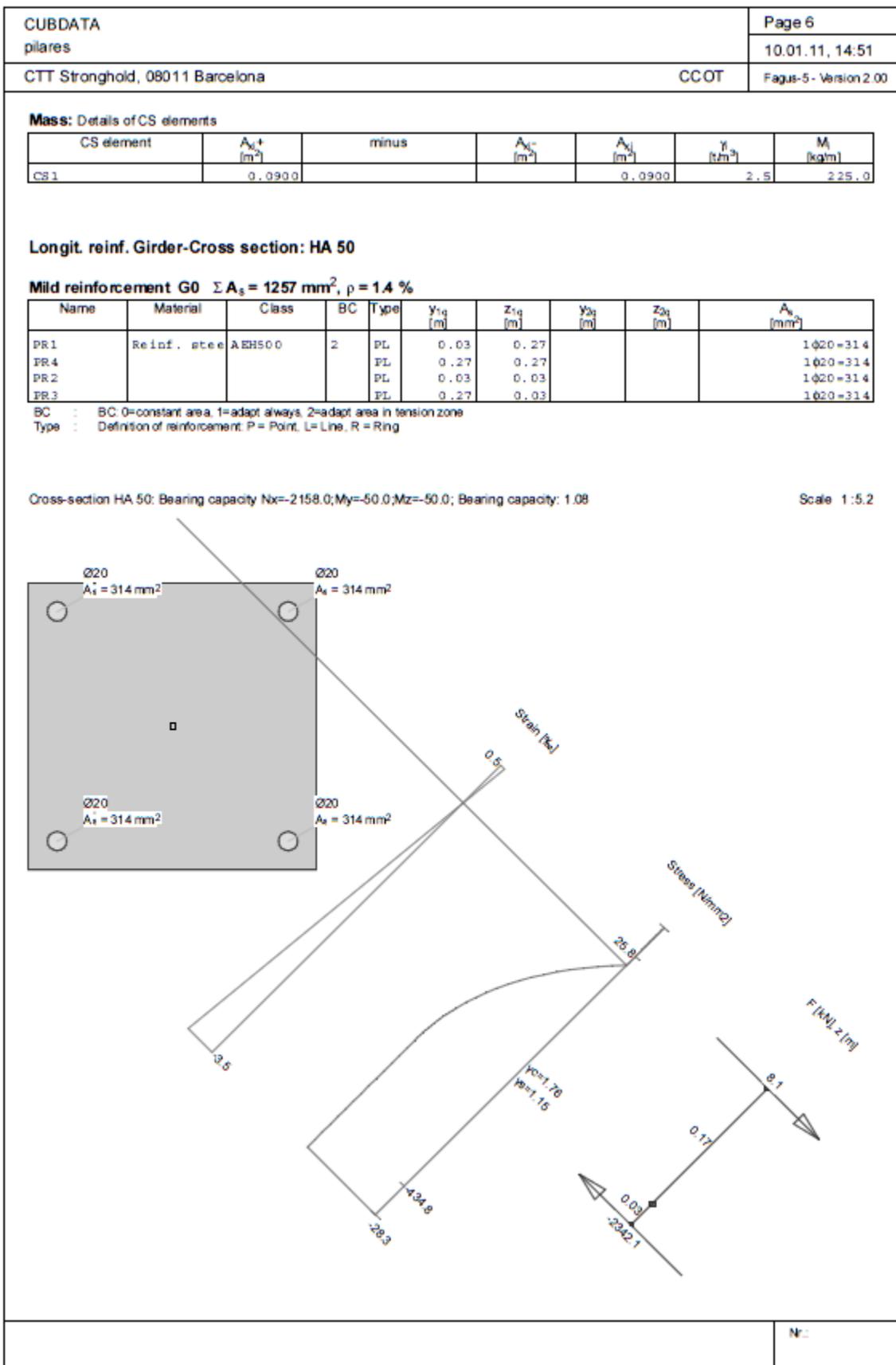
Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	Y_0 (m)	Z_0 (m)	No.	Y_0 (m)	Z_0 (m)
CS1	Concrete HA	H500	Polygon	1	0	0	2	0.30	0
				3	0.30	0.30	4	0	0.30

Section properties of cross section: (without contribution of reinforcement, Reference material: Concrete HA50, $E_{ref} = 42$ [kN/mm²])

	Area [m ²]	Moments of inertia [m ⁴]	C.G. Angle [m]	
A_x	0.0900	I_x	y_{cg}	0.15
A_y (= A_x)		I_y	z_{cg}	0.15
A_z (= A_x)		I_z	β	0 [°]

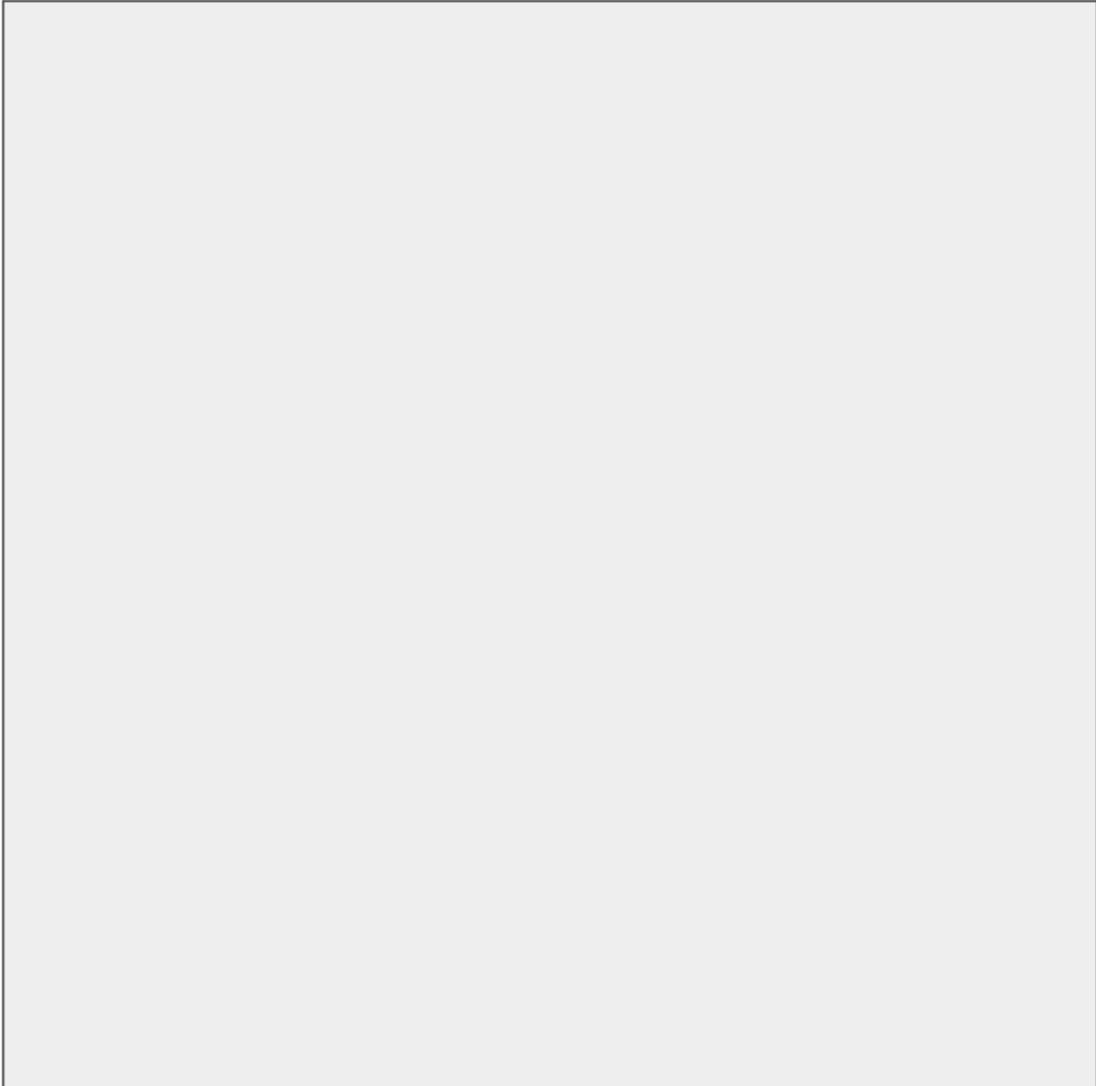
CUBDATA/Drawn: ECR



F:\CUBDATA\pilares FG5

CUBDATA						Page 7										
pilares						10.01.11, 14:51										
CTT Stronghold, 08011 Barcelona						CCOT										
						Fagus-5 - Version 2.00										
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 50																
Action forces and capacity factor																
No.	Analysis-Parameters					N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	Capacity factor (-)	Remarks						
1	AP2: ULS-verification					-2158.0	-50.0	-50.0	1.08							
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91																
ID	σ-ε-Diagram				Strain Limits			Adm.Stress σ _{s,adm} [N/mm ²]	Partial factors				Various parameters			
	c	s	p	a	ε _{cu,c} [‰]	ε _{cu,b} [‰]	ε _{su} [‰]		γ _c (-)	γ _s (-)	γ _e (-)	γ _a (-)	α (-)	φ (-)	P(t) (-)	κ
AP2	2/0	1	1	1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=0	-
α : Inclination of diagonal in compression φ : Creep coefficient P(t) : STATIK-5 analysis: Initial value of PT force: P=P(t=0) or P=P(t=∞) 'with longterm-losses' κ : += Analysis with bond coefficient: κ _s =0.7 κ _p =0.9																
Extreme stresses and strain																
Name	Class		Y _q [m]	Z _q [m]	ε [‰]	σ _d [N/mm ²]		γ (-)								
CS1	H500		0.00	0.00	-3.5	-28.3		1.76								
CS1	H500		0.30	0.30	0.5	0		1.76								
PR2	AEBH500		0.03	0.03	-3.1	-434.8		1.15								
PR4	AEBH500		0.27	0.27	0.1	25.8		1.15								
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 50																
Action forces and capacity factor																
No.	Analysis-Parameters					N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	Capacity factor (-)	Remarks						
1	AP2: ULS-verification					-2158.0	-50.0	-50.0	1.08							
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91																
ID	σ-ε-Diagram				Strain Limits			Adm.Stress σ _{s,adm} [N/mm ²]	Partial factors				Various parameters			
	c	s	p	a	ε _{cu,c} [‰]	ε _{cu,b} [‰]	ε _{su} [‰]		γ _c (-)	γ _s (-)	γ _e (-)	γ _a (-)	α (-)	φ (-)	P(t) (-)	κ
AP2	2/0	1	1	1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=0	-
α : Inclination of diagonal in compression φ : Creep coefficient P(t) : STATIK-5 analysis: Initial value of PT force: P=P(t=0) or P=P(t=∞) 'with longterm-losses' κ : += Analysis with bond coefficient: κ _s =0.7 κ _p =0.9																
Extreme stresses and strain																
Name	Class		Y _q [m]	Z _q [m]	ε [‰]	σ _d [N/mm ²]		γ (-)								
CS1	H500		-0.00	-0.00	-3.5	-28.3		1.76								
CS1	H500		0.30	0.30	0.5	0		1.76								
PR2	AEBH500		0.03	0.03	-3.1	-434.8		1.15								
PR4	AEBH500		0.27	0.27	0.1	25.7		1.15								
						N:										

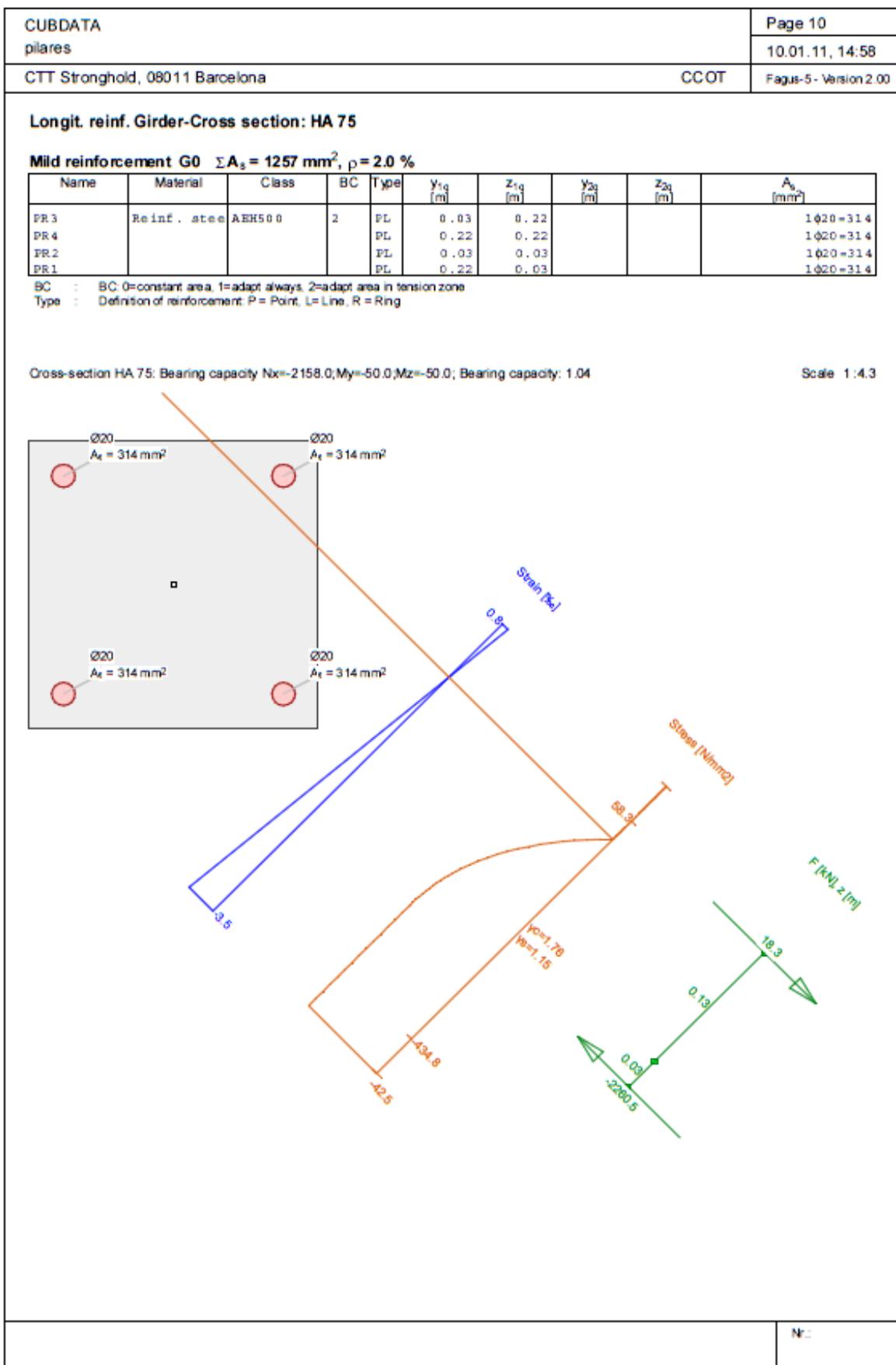
F:\CUBDATA\pilares.FG5

CUBDATA pilares		Page 8							
CTT Stronghold, 08011 Barcelona		10.01.11, 14:58							
		CCOT	Fagus-5 - Version 2.00						
Cross-section HA 75: Outline, without reinforcements		Scale 1:1.5							
									
Girder-Cross section: HA 75									
Geometrical definition of cross section									
Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
CS1	Concrete HA	HA750	Polygon	1	0	0	2	0.25	0
				3	0.25	0.25	4	0	0.25
							Nr:		

F:\CUBDATA\pilares FCS

CUBDATA pilares		Page 9	
CTT Stronghold, 08011 Barcelona		CCOT	10.01.11, 14:58
			Fagus-5 - Version 2.00
Section properties of cross section: (without contribution of reinforcement, Reference material: Concrete HA75, $E_{ref} = 55 \text{ [kN/mm}^2\text{]}$)			
	Area (m ²)	Moments of inertia (m ⁴)	C.G. Angle (m)
Ax	0.0625	Ix	0.000549
Ay	(=Ax)	Iy	0.000326
Az	(=Ax)	Iz	0.000326
		ya	0.13
		za	0.13
		β	0. (*)
Mass: Details of CS elements			
CS element	A _{cs} ⁺ (m ²)	minus	A _{cs} ⁻ (m ²)
			A _{cs} ¹ (m ²)
			γ (t/m ³)
			M ₁ (kg/m)
CS1	0.0625		0.0625
			2.5
			156.3
Cross-section HA 75: Outline, Reinforcements			Scale 1:1.6
			Nº:

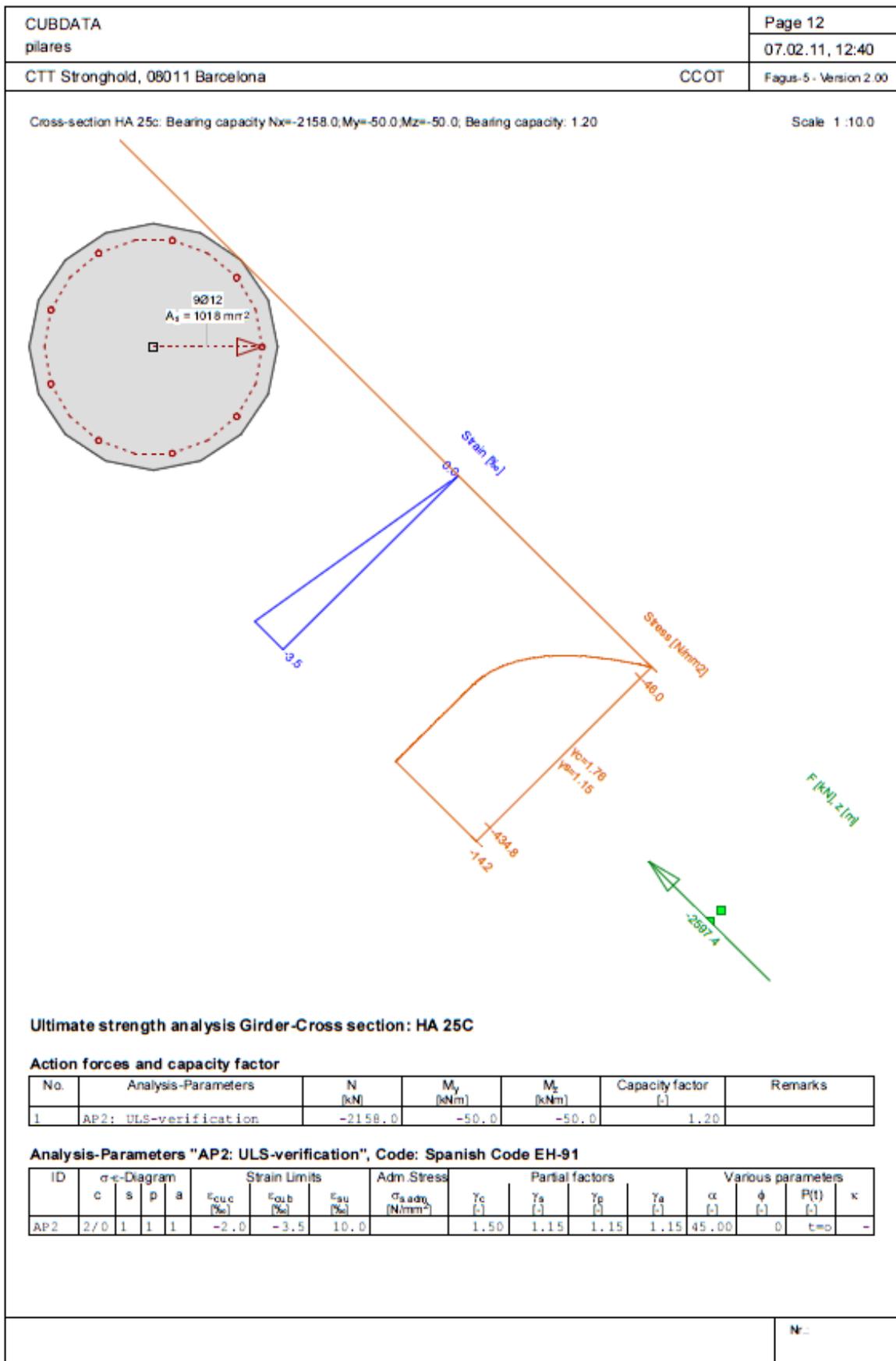
F:\CUBDATA\pilares.FG5

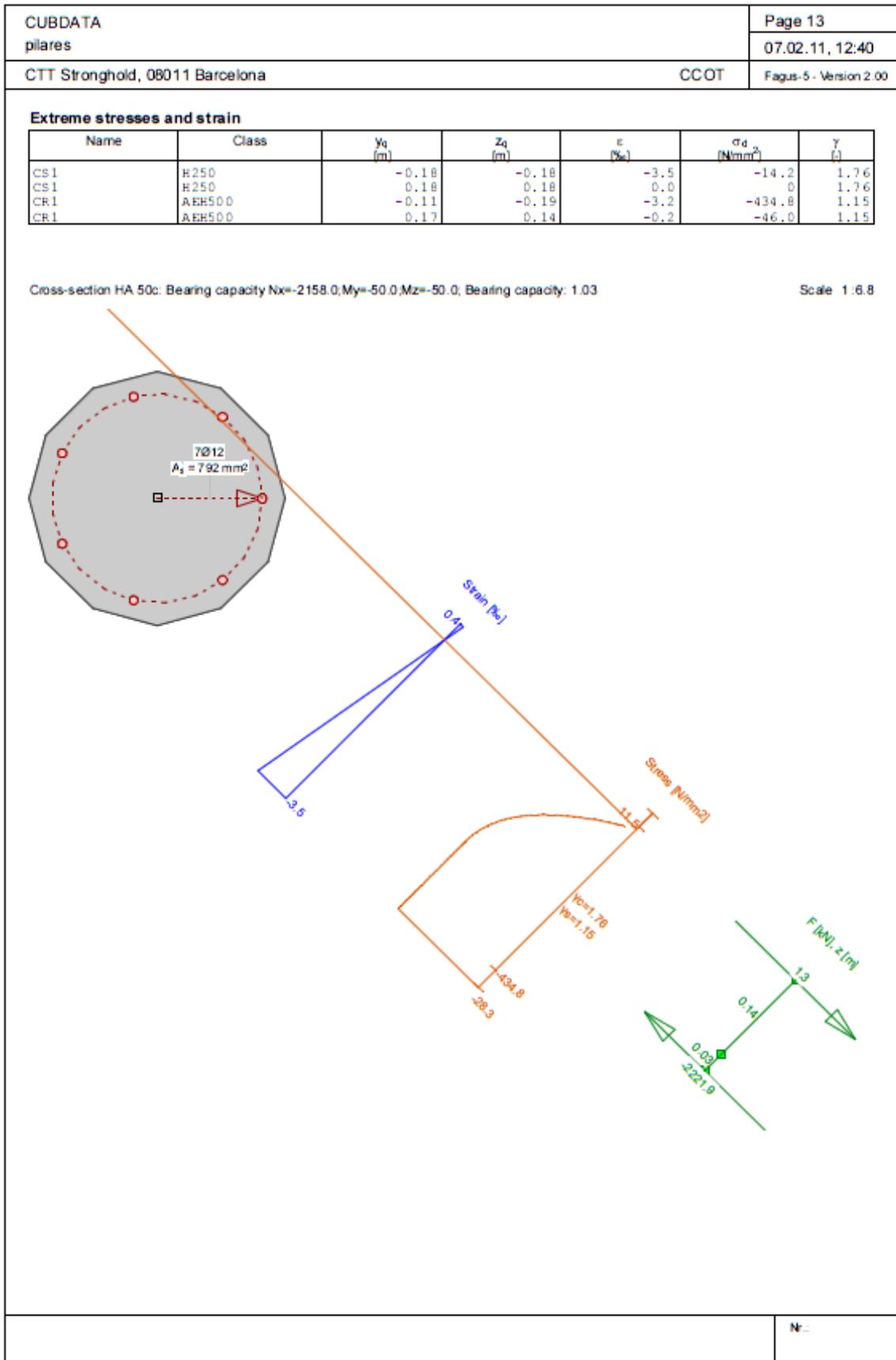


F:\CUBDATA\pilares.FG5

CUBDATA pilares						Page 11 10.01.11, 14:58							
CTT Stronghold, 08011 Barcelona					CCOT	Fagus-5- Version 2.00							
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 75													
Action forces and capacity factor													
No.	Analysis-Parameters	N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	Capacity factor [-]	Remarks							
1	AP2: ULS-verification	-2158.0	-50.0	-50.0	1.04								
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91													
ID	σ-ρ-Diagram	Strain Limits			Adm.Stress	Partial factors				Various parameters			
	c s p a	ε _{cu,c} [%]	ε _{cu,b} [%]	ε _{cu} [%]	σ _{s,adm} [N/mm ²]	γ _c [-]	γ _s [-]	γ _e [-]	γ _a [-]	α [-]	φ [-]	P(t) [-]	κ
AP2	2/0 1 1 1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=c	-
α : Inclination of diagonal in compression φ : Creep coefficient P(t) : STATK-5 analysis: initial value of PT force: P=P(t=0) or P=P(t=∞) 'with longterm-losses' κ : += Analysis with bond coefficient: κ _s =0.7 κ _e =0.9													
Extreme stresses and strain													
Name	Class	y ₁ [m]	z ₁ [m]	ε [%]	σ _d [N/mm ²]	γ [-]							
CS1	HA750	0	0	-3.5	-42.5	1.76							
CS1	HA750	0.25	0.25	0.8	0	1.76							
FR2	AEH500	0.03	0.03	-3.0	-434.8	1.15							
FR4	AEH500	0.22	0.22	0.3	58.3	1.15							
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 75													
Action forces and capacity factor													
No.	Analysis-Parameters	N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	Capacity factor [-]	Remarks							
1	AP2: ULS-verification	-2158.0	-50.0	-50.0	1.04								
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91													
ID	σ-ρ-Diagram	Strain Limits			Adm.Stress	Partial factors				Various parameters			
	c s p a	ε _{cu,c} [%]	ε _{cu,b} [%]	ε _{cu} [%]	σ _{s,adm} [N/mm ²]	γ _c [-]	γ _s [-]	γ _e [-]	γ _a [-]	α [-]	φ [-]	P(t) [-]	κ
AP2	2/0 1 1 1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=c	-
α : Inclination of diagonal in compression φ : Creep coefficient P(t) : STATK-5 analysis: initial value of PT force: P=P(t=0) or P=P(t=∞) 'with longterm-losses' κ : += Analysis with bond coefficient: κ _s =0.7 κ _e =0.9													
Extreme stresses and strain													
Name	Class	y ₁ [m]	z ₁ [m]	ε [%]	σ _d [N/mm ²]	γ [-]							
CS1	HA750	0	0	-3.5	-42.5	1.76							
CS1	HA750	0.25	0.25	0.8	0	1.76							
FR2	AEH500	0.03	0.03	-3.0	-434.8	1.15							
FR4	AEH500	0.22	0.22	0.3	58.2	1.15							
						Nc:							

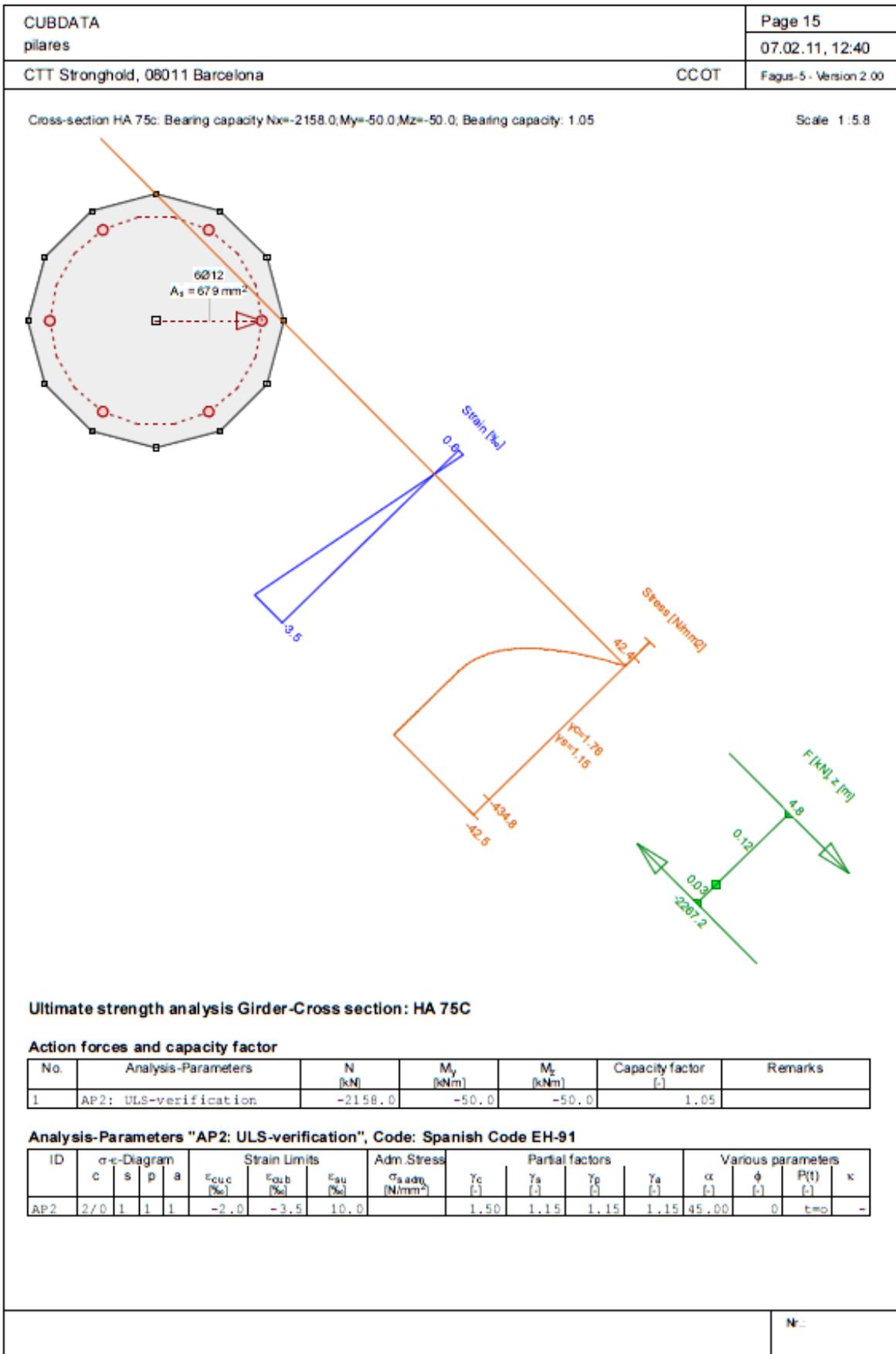
F:\CUBDATA\pilares FG5





CUBDATA						Page 14										
pilares						07.02.11, 12:40										
CTT Stronghold, 08011 Barcelona				CCOT		Fagus-5 - Version 2.00										
Ultimate strength analysis Girder-Cross section: HA 50C																
Action forces and capacity factor																
No.	Analysis-Parameters	N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	Capacity factor [-]	Remarks										
1	AP2: ULS-verification	-2158.0	-50.0	-50.0	1.03											
Analysis-Parameters "AP2: ULS-verification", Code: Spanish Code EH-91																
ID	σ-ε-Diagram				Strain Limits			Adm.Stress σ _{s adm} [N/mm ²]	Partial factors				Various parameters			
	c	s	p	a	ε _{cu,c} [%]	ε _{cu,b} [%]	ε _{cu} [%]		γ _c [-]	γ _s [-]	γ _p [-]	γ _a [-]	α [-]	φ [-]	P(t) [-]	κ
AP2	2/0	1	1	1	-2.0	-3.5	10.0		1.50	1.15	1.15	1.15	45.00	0	t=0	-
Extreme stresses and strain																
Name	Class	Y _q [m]	Z _q [m]	ε [%]	σ _{d,z} [N/mm ²]	γ [-]										
CS1	H500	-0.09	-0.15	-3.5	-28.3	1.76										
CS1	H500	0.09	0.15	0.4	0	1.76										
CR1	AEH500	-0.13	-0.06	-3.1	-434.8	1.15										
CR1	AEH500	0.09	0.11	0.1	11.5	1.15										
						N:										

F:\CUBDATA\pilares FG5



F:\CUBDATA\pilares.FG5

CUBDATA pilares						Page 16	
CTT Stronghold, 08011 Barcelona						07.02.11, 12:40	
CCOT						Fagus-5 - Version 2.00	
Extreme stresses and strain							
Name	Class	y_q (m)	z_q (m)	ϵ (‰)	σ_d (N/mm ²)	γ (°)	
CS1	HA750	-0.13	-0.08	-3.5	-42.5	1.76	
CS1	HA750	0.13	0.08	0.6	0	1.76	
CR1	AER500	-0.06	-0.11	-3.1	-434.8	1.15	
CR1	AER500	0.06	0.11	0.2	42.4	1.15	
						Nr:	

F:\CUBDATA\pilares.FG5

ANEJO 2

CÁLCULO DE EMISIONES DE CO₂

Las emisiones de CO₂ han sido obtenidas mediante el cálculo de la EPD del hormigón, propuesta en el CTN83/SC12 (subcomité de sostenibilidad del hormigón de AENOR).

Para el cálculo de la EPD se ha realizado la simplificación asumiendo que las emisiones de humo de sílice y nanosílice son las mismas que del cemento. También se ha considerado que el filler genera las mismas emisiones que un árido.

DATOS		
Distancias transporte	km transporte cemento-planta hormigón	150
	km transporte árido-planta hormigón	50
	km transporte aditivo-planta hormigón	150
	km transporte hormigón-obra	15
Mix	tCO ₂ /kWh	0,000315
Fabricación	kWh/t Fabricación árido	4
	kWh/m ³ Fabricación hormigón	2
Emisiones transporte	tCO ₂ /m ³ km transporte cemento	0,00001
	tCO ₂ /m ³ km transporte árido	0,00007049
	tCO ₂ /m ³ km transporte hormigón	0,000244
Consumo agua	kg/t Cemento	1693
	kg/m ³ Hormigón	150
Residuos	kg/t Residuos NP cemento	665
	kg/t Residuos P cemento	1,2
	kg/t Residuos NP Aditivo	3,4
	kg/t Residuos P Aditivo	0,17

DATOS		
Recursos/energía	MJ/t Cemento, Renovable	289
	MJ/t Cemento, No renovable	4509
	MJ/t Aditivo no renovable (nat+no nat)	4600
	kg/t Cemento no renovable	1509
	kg/t Arido no renovable	0

Mediante esta información se han realizado los cálculos de la EPD para obtener las emisiones de CO₂ de las dosificaciones consideradas que se muestran a continuación:

DOSIFICACIONES EMPLEADAS							
MATERIALES		HA-25		HA-50		HA-75	
		B	AC	B	AC	B	AC
Cemento	CEM I (kg)	262	300	450	450	500	500
Adiciones	Filler (kg)	-	100	-	-	-	-
	Nano sílice (kg)	-	-	-	-	10	10
Áridos (kg)		1851	1725	1803	1803	1705	1705
Agua (kg)		145	175	180	195	190	215
a/c		0.55	0.58	0.4	0.43	0.38	0.43
Plastificante en base ligno	% spc	0.7	0.9	0.3	0.8	0.3	0.8
	(kg)	1.8	2.7	1.4	3.6	1.5	4.0
Superplastificante (PCE)	% spc	0.3	1.5	0.7	1.3	0.7	1.3
	(kg)	0.8	4.5	3.2	5.9	3.5	6.5
Total tCO₂/m³		0.20584	0.23598	0.34261	0.34504	0.38588	0.38859

ANEJO 3

CÁLCULOS ECONÓMICOS

Todos los valores que aparecen en este capítulo hacen referencia a los costes (€) que se han tenido en cuenta para el cálculo del coste total de la ejecución de pilares.

SECCIONES RECTANGULARES

MANO DE OBRA

Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
Oficial 1a	4,67	10,2	10,2	10,2
Ayudante constr.	4,15	9,05	9,05	9,05
Peón	1,96	4,27	4,27	4,27

MONTAJE Y DESMONTAJE DE LOS ENCOFRADOS

Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
25x25	336	347	492,64	43,36
30x30	233,33	298,55	-	19,22
40x40	131,25	238,44	332,63	20,38

MATERIAL NECESARIO PARA EL ENCOFRADO

Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
25x25	0,6	0,6	2,49	0,6
30x30	0,6	0,6	-	0,6
40x40	0,6	0,6	3,55	0,6

MEDIOS AUXILIARES				
Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
25x25	10,77	10,88	13,82	4,8
30x30	8,72	10,28	-	4,69
40x40	6,68	9,08	11,02	4,72

COSTES INDIRECTOS				
Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
25x25	16,48	16,55	21,15	7,34
30x30	13,34	15,73	-	7,18
40x40	10,22	13,89	16,86	7,22

DURABILIDAD				
Encofrado	Chapas metálicas	Molde desechable de MDF	Molde reutilizable MDF	Molde reutilizable de plástico
25x25	27,31	28,58	36,31	12,61
30x30	22,9	27	-	12,33
40x40	17,54	23,84	28,94	12,39

HORMIGÓN		PRECIO
HA25 vibrado		70
HA25 AC		90
HA50 vibrado		110
HA50 AC		130
HA75 vibrado		130
HA75 AC		150

	HORMIGÓN	VIBRADO	AC
40X40	HA25	33,32	42,84
30X30	HA50	29,26	34,58
25X25	HA75	23,79	27,45

PRECIO ACERO	
Acero B500S	0,91 x Kg armadura

	ACERO	€
HA25	45,71 Kg	41,5961
HA50	37,87 Kg	34,4617
HA75	36,17 Kg	32,9147

SECCIONES CIRCULARES

MANO DE OBRA			
Encofrado	Molde desechable helicoidal	Molde desechable liso	Molde reutilizable de plástico
Oficial 1a	3,18	3,18	4,67
Ayudante const	2,82	2,82	4,15
Peón	1,33	1,33	1,96

MONTAJE Y DESMONTAJE DE LOS ENCOFRADOS			
Encofrado	Molde desechable helicoidal	Molde desechable liso	Molde reutilizable de plástico
D30	84,92	115,9	16,02
D35	72,21	106	16,09
D50	66,61	88,61	11,4

MEDIOS AUXILIARES			
Encofrado	Molde desechable helicoidal	Molde desechable lilo	Molde reutilizable de plástico
D30	5,36	5,98	4,06
D35	5,11	5,79	4,06
D50	5	5,44	3,96

COSTES INDIRECTOS			
Encofrado	Molde desechable helicoidal	Molde desechable liso	Molde reutilizable de plástico
D30	8,21	9,16	6,21
D35	7,82	8,85	6,21
D50	7,65	8,32	6,06

DURABILIDAD			
Encofrado	Molde desechable helicoidal	Molde desechable liso	Molde reutilizable de plástico
D30	14,09	15,72	10,65
D35	13,42	15,2	10,66
D50	13,13	14,28	10,41

HORMIGÓN		PRECIO
HA25 vibrado		70
HA25 AC		90
HA50 vibrado		110
HA50 AC		130
HA75 vibrado		130
HA75 AC		150

	HORMIGON	VIBRADO	AC
D50	HA25	41.02	52.74
D35	HA50	31.68	37.44
D30	HA75	27.56	31.8

PRECIO ACERO	
Acero B500S	0,91 x Kg armadura

	ACERO	€
D50	40.45 Kg	36.81
D35	26.83 Kg	24.42
D30	22.7 Kg	20.65

COSTE EJECUCIÓN SECCIONES RECTANGULARES		
HA25 VIBRAT	Chapas metálicas	238,56
	Molde desechable de MDF	364,56
	Molde reutilizable MDF	466,61
	Molde reutilizable de plástico	135,47
HA-25 AC	Chapas metálicas	248,08
	Molde desechable de MDF	374,08
	Molde reutilizable MDF	476,13
	Molde reutilizable de plástico	144,99
HA-50 VIBRAT	Chapas metálicas	333,9
	Molde desechable de MDF	415,81
	Molde reutilizable MDF	-
	Molde reutilizable de plástico	122,34
HA-50 AC	Chapas metálicas	339,22
	Molde desechable de MDF	421,13
	Molde reutilizable MDF	-
	Molde reutilizable de plástico	127,66
HA-75 VIBRAT	Chapas metálicas	434,59
	Molde desechable de MDF	458,51
	Molde reutilizable MDF	613,58
	Molde reutilizable de plástico	139,58
HA-75 AC	Chapas metálicas	438,25
	Molde desechable de MDF	462,17
	Molde reutilizable MDF	617,24
	Molde reutilizable de plástico	143,24
DURABILIDAD SECCIONES RECTANGULARES		
HA-25	Chapas metálicas	17,54
	Molde desechable de MDF	23,84
	Molde reutilizable MDF	28,94
	Molde reutilizable de plástico	12,39
HA-50	Chapas metálicas	22,9
	Molde desechable de MDF	27
	Molde reutilizable MDF	-
	Molde reutilizable de plástico	12,33
HA-75	Chapas metálicas	27,31
	Molde desechable de MDF	28,58
	Molde reutilizable MDF	36,31
	Molde reutilizable de plástico	12,61

COSTE EJECUCIÓN SECCIONES CIRCULARES		
HA25 VIBRAT	Molde desechable helicoidal	164,4195
	Molde desechable liso	187,5295
	Molde reutilizable de plástico	110,0295
HA-25 AC	Molde desechable helicoidal	176,1395
	Molde desechable liso	199,2495
	Molde reutilizable de plástico	121,7495
HA-50 VIBRAT	Molde desechable helicoidal	148,5653
	Molde desechable liso	184,0653
	Molde reutilizable de plástico	93,2353
HA-50 AC	Molde desechable helicoidal	154,3253
	Molde desechable liso	189,8253
	Molde reutilizable de plástico	98,9953
HA-75 VIBRAT	Molde desechable helicoidal	154,037
	Molde desechable liso	186,587
	Molde reutilizable de plástico	85,287
HA-75 AC	Molde desechable helicoidal	158,277
	Molde desechable liso	190,827
	Molde reutilizable de plástico	89,527
DURABILIDAD SECCIONES CIRCULARES		
HA-25	Molde desechable helicoidal	14,09
	Molde desechable liso	15,72
	Molde reutilizable de plástico	10,65
HA-50	Molde desechable helicoidal	13,42
	Molde desechable liso	15,2
	Molde reutilizable de plástico	10,66
HA-75	Molde desechable helicoidal	13,13
	Molde desechable liso	14,28
	Molde reutilizable de plástico	10,41