



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

**GRANDES SILOS DE ALMACENAMIENTO
DE CLÍNKER: ANÁLISIS Y PRIORIZACIÓN**

Presentada por

Antonio Azorín Carrión

Dirigida por

Dr. Julián Cantó Perelló

Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas

Dr. Jorge Curiel Esparza

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2015

A Mireia y Anna.

Resumen, Resum, Abstract.

Resumen

La selección de la tipología más apropiada para sistemas de almacenamiento de materiales, tanto de las materias primas como de los productos resultantes del proceso de fabricación, es esencial para el control de la producción y la gestión de stocks. Hoy en día, en la industria del cemento existen varias técnicas aplicadas al almacenamiento de clínker, como son el silo domo, el almacén longitudinal, el silo cilíndrico o el depósito circular. La selección de la tipología de silo a emplear se ha basado tradicionalmente en la propia experiencia del responsable del proyecto y en factores puramente económicos. Sin embargo, la elección del sistema óptimo depende no sólo de criterios conmensurables como el coste de construcción, sino también de factores intangibles y difícilmente cuantificables que en ocasiones entran en conflicto entre sí.

En la presente tesis doctoral se propone un sistema experto para determinar la tipología óptima de silo, aplicándose a un caso concreto en el que se pretende almacenar 50.000 toneladas de clínker. Se aplica un método híbrido en el que la técnica Delphi y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) son empleados para, apoyándose en un grupo de expertos, establecer y evaluar los criterios de selección así como las posibles alternativas para el almacenamiento de clínker. Por último, la metodología propuesta se sirve del método VIKOR para determinar la tipología de almacenamiento de clínker más adecuada para el caso de estudio, garantizando las condiciones de estabilidad para la solución obtenida.

Resum

La selecció de la tipologia més apropiada per a sistemes d'emmagatzematge de materials, tant de les matèries primeres com dels productes resultants del procés de fabricació, és essencial per al control de la producció i la gestió d'estocs. Avui en dia, en la indústria del ciment existeixen diverses tècniques aplicades a l'emmagatzematge de clínquer, com són la sitja dom, el magatzem longitudinal, la sitja cilíndrica o el dipòsit circular. La selecció de la tipologia de sitja a emprar s'ha basat tradicionalment en la pròpia experiència del responsable del projecte i en factors purament econòmics. No obstant això, l'elecció del sistema òptim depèn no només de criteris commensurables com el cost de construcció, sinó també de factors intangibles i difícilment quantificables que en ocasions entren en conflicte entre si.

En la present tesi doctoral es proposa un sistema expert per determinar la tipologia òptima de sitja, aplicant-se a un cas concret en el qual es pretén emmagatzemar 50.000 tones de clínquer. S'aplica un mètode híbrid en què la tècnica Delphi i el Procés Analític Jeràrquic (AHP) són emprats per, recolzant-se en un grup d'experts, establir i avaluar els criteris de selecció així com les possibles alternatives per a l'emmagatzemament de clínquer. Finalment, la metodologia proposada es serveix del mètode VIKOR per determinar la tipologia d'emmagatzematge de clínquer més adequada per al cas d'estudi, garantint les condicions d'estabilitat per a la solució obtinguda.

Abstract

Selecting an appropriate material storage system typology, for the raw material as well as for the products resulting from the manufacturing process, is essential for the management of production and control stock processes. Nowadays there are several available techniques applied in cement industry for storing clinker, such as silos dome, longitudinal stores, round silos or circular stores. The selection of the silo typology to be used has traditionally been based on the project manager own experience and on purely economic factors. However, the election depends not only on commensurable criteria, such as the construction cost, but also on intangible and not easily quantifiable factors which sometimes come into conflict with each other.

This thesis proposes an expert system to determine the optimal silo typology for storing 50,000 tons of cement clinker. A hybrid approach is applied in which the Delphi method and the Analytic Hierarchy Process (AHP) are used, taking account of a group of experts, to assess the selection factors and the possible alternatives for clinker storage. Finally, the proposed methodology uses VIKOR technique to establish the most adequate storage facility according to these criteria for the studied case and to guarantee stability condition.

Contenido

Resumen, Resum, Abstract.....	5
Capítulo 1 Introducción	21
Capítulo 2 La Industria del Cemento	29
2.1. Introducción	29
2.2. Proceso de producción	41
Capítulo 3 Sistemas de almacenamiento del clínker	61
3.1. Depósito circular	66
3.2. Silo cilíndrico	73
3.3. Almacén longitudinal	82
3.4. Silo domo.....	86
Capítulo 4 Método de investigación.....	95
4.1. El método Delphi.....	100
4.2. El método AHP.....	122
4.3. Técnica VIKOR.....	132

Capítulo 5	Aplicación de la metodología propuesta	137
5.1.	Definición del objetivo	137
5.2.	Jerarquización del problema	139
5.3.	Valoración de criterios	143
5.4.	Evaluación de los sistemas de almacenamiento de clínker	159
5.5.	Priorización del sistema más adecuado	172
Capítulo 6	Resultados y conclusiones.....	179
Capítulo 7	Referencias bibliográficas	185
Anejo: Artículo publicado.....		197

Listado de tablas

Tabla 2.1. Composición química del clínker (% en masa).

Tabla 2.2. Productos de la familia de los cementos comunes.

Tabla 4.3. Índice de consistencia aleatorio (RCI).

Tabla 5.1. Notación de la escala fundamental de Saaty para la comparación por pares.

Tabla 5.2. Cuestionario para evaluar los criterios

Tabla 3. Resultados de la evaluación de criterios respecto al objetivo global.

Tabla 5.4. Vector de prioridad y análisis de consistencia para la matriz de comparación de criterios por pares.

Tabla 5.5. Cuestionario para evaluar los sistemas de almacenamiento de clínker.

Tabla 5.6. Resultados de evaluar los sistemas de almacenamiento de clínker para el criterio Costes de Construcción (CC).

Tabla 5.7. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (OP).

Tabla 5.8. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (CC).

Tabla 5.9. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (OC).

Tabla 5.10. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SC).

Tabla 5.11. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (PD).

Tabla 5.12. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (DU).

Tabla 5.13. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SA).

Tabla 5.14. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SU).

Tabla 5.15. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (VI).

Tabla 5.16. Matriz de prioridades para la elección del sistema de almacenamiento de clínker más adecuado.

Tabla 5.17. Valores f_i^* y f_i^- para los 9 criterios considerados.

Tabla 5.18. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=0.5$).

Tabla 5.19. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=1$).

Tabla 5.20. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=0$).

Tabla A.1. Datos de la revista ZKG International.

Listado de figuras

Figura 1.1. Información del Joint Research Centre para el almacenamiento de clínker.

Figura 1.2. Esquema del Silo Cilíndrico (RCS, Round Clinker Silo).

Figura 1.3. Esquema del Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (LSG, Longitudinal Store with Gravity Discharge).

Figura 1.4. Esquema del Depósito Circular con descarga por gravedad (CSG, Circular Store with Gravity Discharge).

Figura 1.5. Esquema del Silo Domo (CSD, Clinker Storage Dome).

Figura 1.6. Diagrama del método híbrido propuesto.

Figura 2.1. Reconstrucción de cabaña pavimentada en Lepenski Vir (Serbia).

Figura 2.2. Vista de la cúpula del Panteón de Roma.

Figura 2.3. Dibujo del faro de Eddystone, en el litoral de Cornish (Inglaterra).

Figura 2.4. Fragmentos de clínker y producto final tras la molienda y adiciones: el cemento.

Figura 2.5. Esquema del proceso de producción del cemento.

Figura 2.6. Corte esquemático del molino de bolas.

Figura 2.7. Parque de homogeneización.

Figura 2.8. Precalentador de ciclones.

Figura 2.9. Torre del precalentador de ciclones.

Figura 2.10. Esquema del horno de clínker.

Figura 2.11. Enfriador de satélites.

Figura 2.12. Almacenamiento de clínker, Cementos Bocaya (Colombia).

Figura 2.13. Molienda del clínker.

Figura 2.14. Silos de cemento.

Figura 2.15. Muelle de la planta de Cemex Alcanar (Tarragona).

Figura 2.16. Diagrama de bloques del proceso de fabricación del cemento.

Figura 3.1. Mejores sistemas disponibles para el almacenamiento de clínker.

Figura 3.2. Depósito circular de clínker, Tula (Méjico).

Figura 3.3. Esquema de un depósito circular para el almacenamiento de clínker.

Figura 3.4. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker de un depósito circular.

Figura 3.5. Esquema de un depósito circular con muro perimetral.

Figura 3.6. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker de un depósito circular con muro perimetral.

Figura 3.7. Cubierta metálica y casetón superior.

Figura 3.8. Sección tipo de un depósito circular con cono inferior.

Figura 3.9. Esquema estructural de un depósito circular.

Figura 3.10. Silo cilíndrico para clínker.

Figura 3.11. Esquema del almacenamiento de clínker en silos cilíndricos.

Figura 3.12. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker del silo cilíndrico.

Figura 3.13. Modelo estructural de la cubierta de un silo cilíndrico.

Figura 3.14. Sistemas de alimentación y descarga del silo cilíndrico.

Figura 3.15. Silo cilíndrico con dos túneles de descarga por gravedad.

Figura 3.16. Construcción de la cimentación de un silo cilíndrico para clínker.

Figura 3.17. Silo cilíndrico para clínker en construcción.

Figura 3.18. Ejecución de la cubierta y casetón superior de un silo cilíndrico para clínker.

Figura 3.19. Almacén longitudinal para clínker.

Figura 3.20. Pila de almacenamiento longitudinal.

Figura 3.21. Estructura de cerramiento del almacén longitudinal.

Figura 3.22. Vista interior de un almacén longitudinal.

Figura 3.23. Silo domo para clínker.

Figura 3.24. Aprovechamiento del volumen interior del silo domo.

Figura 3.25. Modelización mediante elementos finitos.

Figura 3.26. Ejecución del domo, fijación de la membrana de pvc.

Figura 3.27. Ejecución del domo, fijación de la membrana de pvc.

Figura 3.28. Ejecución del domo, hormigonado.

Figura 3.29. Ejecución del domo, ferrallado interior.

Figura 3.30. Domo para parque de homogeneización.

Figura 3.31. Túnel de extracción en Silo Domo.

Figura 4.1. Método Delphi, primer cuestionario, jerarquización del problema.

Figura 4.2. Método AHP, segundo cuestionario, evaluación de criterios.

Figura 4.3. Método AHP, tercer cuestionario, evaluación de alternativas.

Figura 4.4. Técnica VIKOR, solución de compromiso.

Figura 4.5. Sucesivas estimaciones del nº de bombas requerido.

Figura 4.6. Esquema del método Delphi

Figura 4.7. Relación entre el nº de expertos y el error de previsión

Figura 4.8.- Esquema de estructura jerárquica del AHP.

Figura 4.9. Construcción de la matriz de comparación por pares.

Figura 4.10. Forma de la matriz de comparación por pares.

Figura 4.11. Cercanía a la solución ideal.

Figura 5.1. Alternativas para el almacenamiento de clínker.

Figura 5.2. Jerarquía para determinar el sistema de almacenamiento de clínker más adecuado en el caso estudiado.

Figura 5.3. Prioridades obtenidas para cada criterio.

Figura 5.4. Prioridades de selección de las alternativas para cada criterio.

Figura 5.5. Comparación de las estrategias de priorización.

Figura 5.6. Mayor utilidad (S_{min}) y menor rechazo individual (R_{min}).

Figura 6.1. Prioridades obtenidas para cada criterio expresadas en porcentajes.

Figura 6.2. Prioridades de elección de las tipologías para los criterios considerados.

Figura 6.3. Cercanía a la solución ideal.

Listado de acrónimos

AHP: Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process).

BCG: Boston Grupo Consultor (Boston Consulting Group).

CC: Coste de Construcción.

CEN: Comité Europeo de Normalización.

CSD: Silo Domo para clínker (Clinker Storage Dome).

CSG: Depósito Circular con descarga por gravedad (Circular Store with Gravity Discharge).

DU: Durabilidad.

EEUU: Estados Unidos de América.

EN: Norma Europea (European Norm)

LSG: Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (Longitudinal Store with Gravity Discharge).

MCDM: Toma de Decisiones Multicriterio (Multiple Criteria Decision Making).

OC: Costes de Operación.

OP: Operatividad.

PD: Duración del proyecto.

RCS: Silo Cilíndrico para clínker (Round Clinker Silo).

SA: Seguridad.

SC: Características del suelo.

SU: Sostenibilidad ambiental.

TOPSIS: Técnica de soporte para la toma de decisiones (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution).

UE: Unión Europea.

VI: Impacto visual.

VIKOR: Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje).

ZKG: Cemento, cal, yeso (Zement Kalk Gyps).

Capítulo 1

Introducción

La contribución de la industria europea del cemento y el hormigón a la economía actual supone una producción total de 74.000 millones de euros y un valor añadido de 22.000 millones de euros, lo que representa unos 366.000 puestos de trabajo directos e indirectos relacionados con la producción de cemento (BCG, 2013). En cuanto a volúmenes de producción, en el presente, la producción europea de cemento ronda los 263 millones de toneladas, representando un 7,6% del total mundial (Cembureau, 2013).

Las grandes estructuras de almacenamiento de materiales juegan un papel importante en el proceso de fabricación de cemento, permitiendo tanto la gestión de las materias primas y productos intermedios como el almacenamiento del producto final. Estos silos de almacenamiento son esenciales para abordar las fluctuaciones entre el suministro de materiales y su aplicación en el proceso de producción o entre las ventas del producto final y su producción. Así pues, la correcta elección del sistema de almacenamiento adecuado tendrá un impacto significativo en la gestión de los procesos de producción y de los beneficios económicos obtenidos.

En la actualidad podemos encontrar en la literatura científica diversas técnicas para determinar las presiones ejercidas por los materiales almacenados y para abordar el diseño estructural de los silos y de sus equipos mecánicos asociados (Sadowski & Rotter, 2013); (Hillewaere, Degroote, Lombaert, Vierendeels, & Degrande, 2013); (Zhao, Cao, & Su,

2013). Sin embargo, existe un importante vacío en lo relativo a la elección de la tipología de almacenamiento más adecuada en cada caso, como paso previo y esencial al dimensionamiento y optimización de la propia construcción. Así, el Documento de Referencia del Joint Research Centre (European Commission, 2013) que establece las mejores técnicas disponibles para la Producción de Cemento, apenas dedica una página al almacenamiento de clínker, enumerando distintas tipologías de sistemas de almacenamiento de clínker y realizando una comparativa que se limita a indicar, de modo orientativo, unos costes relativos de implantación entre los distintos sistemas.

No.	BAT Evaluation Item	Clinker Storage Systems			
		LSGD	CSGD	CSS	CSD
1.	Consumables:				
1.1	Wear Parts	Negligible			
1.2	Air, - ambient - compressed	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
1.3	Water	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
2.	Energy Consumption:				
2.1	Thermal	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
2.2	Electrical	< 0.70 kWh/t			
3.	Waste Generation:				
3.1	Solid	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
3.2	Liquid	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
3.3	Energy	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
4.	Emissions:				
4.1	To air	Fugitive dust if venting system is not properly maintained or storage is not dust tight			
4.2	To water	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
4.3	Noise	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
4.4	Odour	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
7.	Relative Costs:				
7.1	Investment costs	120%	100%	100%	80-90%
7.2	Operating costs	Negligible differences			

Figura 1.1. Información del Joint Research Centre para el almacenamiento de clínker.

La actual directiva referente a las emisiones industriales (2010/75/UE) y la Decisión de la Comisión Europea (2013/163/UE) sobre emisiones industriales en la producción de cemento concluyen que, para el almacenamiento de clínker, los silos de clínker y las áreas de almacenamiento totalmente cerradas y automatizadas se consideran la solución más eficaz al problema de polvo difuso generado durante las operaciones de llenado.

Hoy en día existen soluciones cerradas de almacenamiento que cumplen las recomendaciones de estas Directivas. De acuerdo con el Joint Research Center (European Commission, 2013) los mejores sistemas de almacenamiento disponibles para la industria del cemento, para las capacidades de almacenamiento habitualmente adoptadas, son: el Silo Cilíndrico (RCS, Round Clinker Silo); Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (LSG, Longitudinal Store with Gravity Discharge); El Depósito Circular con descarga por gravedad (CSG, Circular Store with Gravity Discharge) y el Silo Domo (CSD, Clinker Storage Dome).

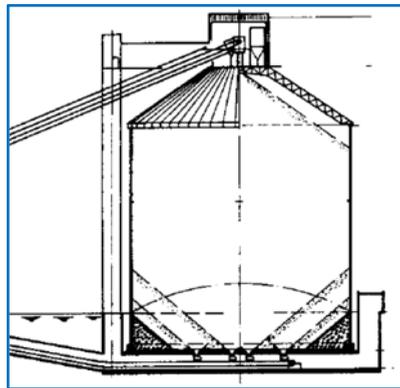


Figura 1.2. Esquema del Silo Cilíndrico (RCS, Round Clinker Silo).

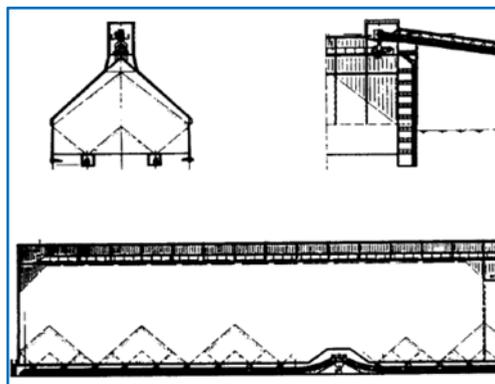


Figura 1.3. Esquema del Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (LSG, Longitudinal Store with Gravity Discharge).

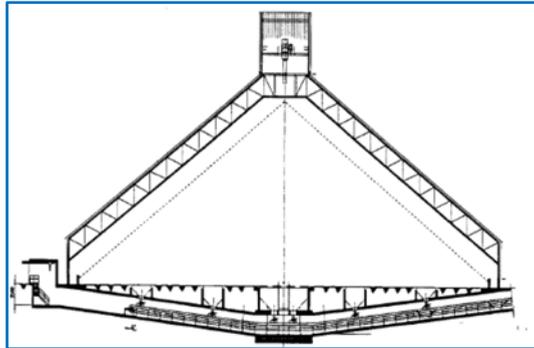


Figura 1.4. Esquema del Depósito Circular con descarga por gravedad (CSG, Circular Store with Gravity Discharge).

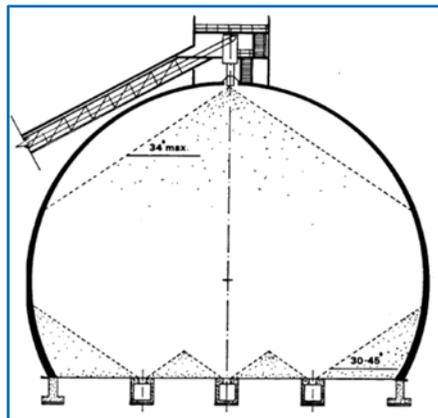


Figura 1.5. Esquema del Silo Domo (CSD, Clinker Storage Dome).

Así pues, el responsable del proyecto deberá elegir entre estos sistemas el tipo de almacenamiento más adecuado en cada caso concreto. La figuras 1.2 a 1.5 muestran los esquemas de estas instalaciones cuyas características se describen en posteriores capítulos.

Para adoptar una decisión, el técnico se encuentra ante un importante dilema a la hora de determinar cuál de éstas es la tipología más adecuada para una determinada instalación industrial. Ante la poca información disponible en la literatura científica especializada, la elección de la tipología del almacén se ha basado tradicionalmente en la propia experiencia del ingeniero responsable y en criterios puramente económicos.

Sin embargo, la elección del tipo de silo no sólo depende de criterios conmensurables, como el costo de la construcción, sino también de factores intangibles y difícilmente cuantificables. En este problema de toma de decisiones, el director del proyecto en general, tiene que identificar los factores de decisión más relevantes y evaluar su importancia relativa con el fin de establecer la instalación más adecuada. La selección de la tipología óptima silo consiste en el análisis y evaluación de criterios tangibles e intangibles tales como: el coste de construcción (Teichler, 2010); Los costes de operación (Alsop, 2014); la operatividad de material (Wilson, 2013); las características del suelo (Mistrikova & Jendzelovsky, 2012); la duración del proyecto (Dembla & Mersmann, 2007); la durabilidad de la instalación (Lippold, 2012); el riesgo de fallo (Radandt, 2012); la sostenibilidad ambiental (Mikulcic, Vujanovic, & Duic, 2013) o el Impacto visual de la instalación (Loczy, Gyenizse, Ronczyk, & Dezso, 2007) entre otros.

Por tanto, se puede afirmar que no existe un procedimiento único y general para determinar la tipología del silo de clínker más adecuado para cada instalación. El tipo de instalación se determinará en función del contexto específico en cada caso, atendiendo a la normativa vigente y considerando los costos resultantes. Así pues, la elección del sistema óptimo en cada caso supone un complejo proceso de análisis de los factores o criterios de selección involucrados, de la importancia que se asigne a cada uno de estos criterios y de la evaluación de las posibles soluciones en función de los mencionados factores. Se trata pues de un problema de toma de decisiones que requiere un análisis multicriterio. Este trabajo realiza un estudio de las diferentes tipologías empleadas en la actualidad y presenta un sistema experto para priorizar, en un caso concreto, la tipología de silo más

adecuada para almacenar 50.000 toneladas de clínker de cemento. El procedimiento de selección de la solución más apropiada supone una disyuntiva compleja que requiere que todos los criterios de evaluación sean tenidos en consideración de forma simultánea. El sistema experto propuesto para superar este tipo de criterios heterogéneos es un método híbrido que combina el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con el método Delphi y la técnica VIKOR.

El método Delphi es una técnica de previsión grupal que se sustenta en el juicio de un conjunto de expertos, se trata de un proceso iterativo y sistemático que pretende obtener los juicios y, si es posible, el consenso de este grupo de expertos (Gracht, 2012). Así, mediante el uso de una serie de cuestionarios anónimos, el Delphi es una técnica adecuada para recopilar datos del panel de expertos seleccionados y para la consecución de consenso (Hsu & Sandord, 2007).



Figura 1.6. Diagrama del método híbrido propuesto.

El método AHP (Saaty, 1980), es un método efectivo para la resolución de problemas multicriterio de toma de decisiones, que ha sido aplicado para la gestión y la toma de decisiones en diversas áreas de la ingeniería y la construcción (Canto-Perello, Curiel-Esparza, & Calvo, 2013); (Martin-Utrillas, Juan-Garcia, Canto-Perello, & Curiel-Esparza, 2014), demostrando que es una técnica apropiada para estructurar el conocimiento y abordar el consenso en estos problemas multicriterio complejos

(Zavadskas, Turskis, & Tamosaitiene, 2011). Así pues, el AHP proporciona una teoría de la cuantificación relativa en escalas absolutas, capaz de tratar criterios intangibles, basada a la evaluación de juicios en comparaciones por pares realizadas por expertos con conocimientos en la materia (Lee & Chan, 2008); (Syamsuddin & Hwang, 2010).

Finalmente, el método VIKOR encuentra una solución de compromiso en problemas complejos de toma de decisiones que involucran criterios intangibles y no conmensurables y que pudieren entrar en conflicto entre sí. Esta solución de compromiso será la más cercana a la ideal de las soluciones que han sido evaluadas de acuerdo con a los criterios de selección establecidos (Opricovic & Tzeng, 2004). Asimismo se realiza un análisis de la estabilidad del proceso, de modo que solución de compromiso lograda proporcione la máxima utilidad para la mayoría y el menor rechazo individual del panel de expertos consultados.

De este modo, mediante el sistema experto propuesto, se proporciona al tomador de decisiones una metodología científica y sistemática que permite abordar problemas multicriterio que atañen a factores heterogéneos y difícilmente cuantificables, para llegar así a una solución de compromiso.

Capítulo 2

La Industria del Cemento

2.1. Introducción

Si atendemos a la norma europea EN-197-1:2011 (CEN, 2011), podemos definir el cemento como un conglomerante hidráulico, esto es, un producto inorgánico producido en forma pulverulenta que amasado con agua conforma una pasta que fragua debido a reacciones y procesos de hidratación y que, ya endurecido, mantiene su resistencia y estabilidad. Las materias primas fundamentales para su producción son la caliza y la arcilla, que son calcinadas a temperaturas del orden de 1350 - 1450 °C para dar lugar al clínker. Este material intermedio es el principal componente del cemento, puesto que, una vez que el clínker es finamente molido y se le agrega yeso, se convierte en cemento. Cuando el cemento se mezcla y dosifica convenientemente con agua y áridos es capaz de producir hormigón o morteros, productos con numerosas aplicaciones en muy diversos ámbitos de la construcción.

2.1.1. *Reseña histórica*

Pese a que ya lo empleaban los egipcios y los romanos, el cemento se redescubrió nuevamente a comienzos del siglo XIX y ha venido evolucionando con el paso del tiempo, siendo actualmente el cemento portland el

conglomerante hidráulico más empleado en la construcción (Harmsen, 2005).

Una de las construcciones más antiguas de las que tenemos noticia del empleo de un material parecido al cemento es el pavimento de una cabaña en la antigua Yugoslavia, datada alrededor del 5.600 a.C. Concretamente, se trataba de un compuesto formado por cal roja y aditivos. En Chile, en torno al 3.000 a.C., mediante la calcinación de algas se obtenía un conglomerante hidráulico que era empleado para unir las piedras que conformaban las paredes de las chozas. También en el antiguo Egipto hay reseñas del empleo de morteros de yeso y de cal en edificaciones de monumentos como la pirámide de Giza (2.500 a.C.) y en Troya y Micenas para la construcción de muros se utilizaron piedras unidas por arcilla.



Figura 2.1. Reconstrucción de cabaña pavimentada en Lepenski Vir (Serbia).

No obstante, podemos afirmar que los romanos fueron la primera civilización en desarrollar la aplicación del cemento en la construcción, aplicando en su fabricación cal viva y cenizas volcánicas. Así, el cemento fue utilizado en grandes edificaciones municipales, sistemas de agua y saneamiento, y también como conglomerante entre muros para dotar de resis-

tencia y estabilidad a sus construcciones (Choisy, 1999). Alrededor del siglo I de nuestra era, los romanos perfeccionaron este conglomerante añadiendo tierra volcánica procedente de la zona de Pozzuoli, próxima a Nápoles, de este modo pudieron emplear el material para que fraguara bajo el agua. En Panteón de Roma, erigido por Agripa en el año 27 a.C. y reconstruida por Adriano en el año 120 tras un incendio, es una importante muestra del uso del cemento por la civilización romana y se ha convertido en un ejemplo de lo que es una obra durable y bien ejecutada. Su cúpula presenta 44 metros de luz, fue construida en hormigón y posee un único hueco a modo de lucernario en su parte superior. En su construcción se utilizó hormigón elaborado con puzolanas, áridos ligeros y cal. Este producto se colocó en tres capas, disminuyendo la densidad del mismo según se aproximaba al lucernario mediante el uso de áridos de piedra pómez de diferente densidad. Asimismo, con este material fueron edificados los muros del Anfiteatro de Pompeya, año 75, y la cimentación y paredes interiores del Coliseo Romano, año 80, (Elsen, Cizer, & Snellings, 2013).

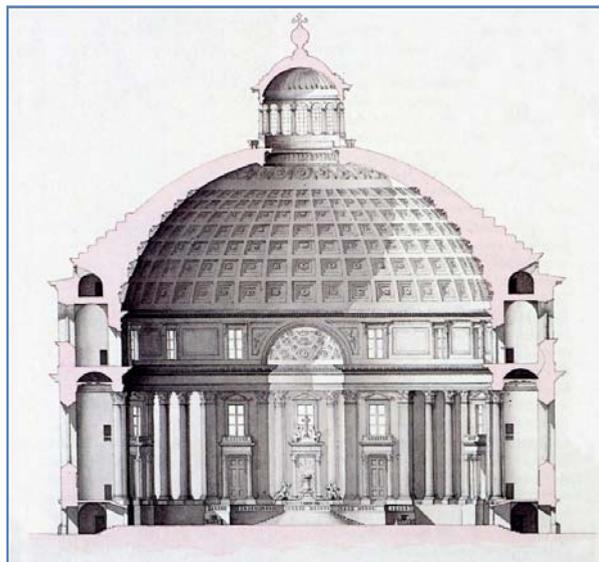
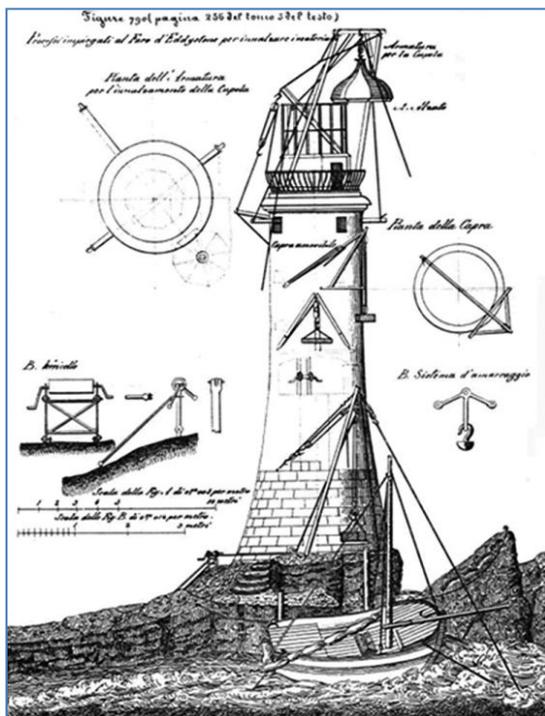


Figura 2.2. Vista de la cúpula del Panteón de Roma.

Sin embargo, el uso del hormigón desaparece después del Imperio Romano, no siendo hasta el siglo XVIII cuando reaparece el interés por el desarrollo de estos materiales. Hacia finales dicho siglo se efectuaron ensayos con diversos tipos de cemento con el fin de aumentar la durabilidad y la resistencia del hormigón. John Smeaton desarrolló un nuevo mortero para reconstruir en 1758 el faro de Eddystone, en el litoral de Cornish. Este ingeniero inglés concluyó que los morteros constituidos al añadir una puzolana a una caliza con una elevada proporción de arcilla fueron los que mejores comportamientos presentaban frente a la acción del agua marina y que la presencia de arcilla en las cales los mejoraba, favoreciendo el fraguado bajo el agua y resultando insolubles una vez endurecidos (Skempton, 1991).



Fuente: CEDEX. Archivo Gráfico de CEHOPU.

Figura 2.3. Dibujo del faro de Eddystone, en el litoral de Cornish (Inglaterra).

Posteriormente, el Reverendo James Parker de forma accidental descubrió una nueva tipología de cemento observando la reacción de las piedras de cal en el fuego. Así, el nuevo producto fue patentado y durante el siglo XIX se empleó profusamente, denominándose “cemento romano”, puesto que se creía, erradamente, que era similar al que 2.000 años antes había usado esta civilización. En 1824 Joseph Aspdin, un constructor de Wakefield (Inglaterra), en un horno calcinó una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla. Se le considera uno de los precursores del cemento moderno y se le denominó cemento portland ya que su apariencia era parecida a la de las calizas de la isla de Portland.

Ahora bien, puede afirmarse que el padre de los cementos tal como los conocemos hoy en día es el químico francés Vicat, que ideó en 1817 un sistema de producción que continúa aplicándose actualmente y que determinó las mezclas de calizas y arcillas dosificadas en las proporciones adecuadas y molidas de forma conjunta, apareciendo pues los primeros cementos naturales, precursores de los actuales portland. Más tarde, en 1838 Brunel utiliza por primera vez un cemento proveniente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sinterización, gracias a la elección de una temperatura de cocción adecuada. Este cemento se empleó en la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres.

El cemento portland actual fue elaborado en 1845 por Isaac C. Johnson al moler finamente los nódulos sobrecocidos que se hallaban a la salida del horno de Aspdin. A partir de esta experiencia elevó las temperaturas de cocción hasta conseguir la sinterización de la mezcla y mejoró las dosificaciones (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014). La gran explosión que vivió el sector de la construcción en la segunda mitad del siglo XIX con la ejecución de ferrocarriles, puentes, muelles, etc. favoreció la difusión del empleo de este material y sus fábricas, principalmente las de cemento natural. Igualmente, la aparición de los hornos rotatorios y la invención del molino tubular para la molienda, permitió el surgimiento de la industria del cemento, puesto que se redujeron los costes de elaboración y se aumen-

taron las capacidades de fabricación de este producto, hasta alcanzar producciones de cemento portland en cantidades comerciales.

Asimismo, al igual que la Revolución Industrial causó el progresivo abandono de los procedimientos de fabricación artesanales, el avance de las nuevas tecnologías ha permitido el perfeccionamiento del cemento y de su proceso de producción. Los esfuerzos investigadores se han centrado en promover las adiciones al cemento para optimizar algunas de sus propiedades (Stynoski, Mondal, & Marsh, 2015) (Owens, Russell, Donnelly, Kirk, & Basheer, 2014) y aumentar la sostenibilidad de su proceso productivo (Hasanbeigi, Lobscheid, Lu, Price, & Dai, 2013). Igualmente, la introducción de ciertos desechos industriales como adiciones del cemento se ha convertido en un modo de reutilizar residuos que planteaban un grave problema ambiental, aumentando la sostenibilidad medioambiental de la industria, ya que esto permite la propia reutilización del residuo y una disminución de emisión de CO₂ asociada a la menor cantidad de clínker a producir (Mikulcic, Vujanovic, & Duic, 2013).

2.1.2. El clínker

El clínker de cemento portland es el producto intermedio que se forma por la calcinación de arcilla y caliza a una temperatura que se encuentra entre 1350 y 1450 °C. Más concretamente, el clínker se obtiene por sinterización de una mezcla precisamente dosificada de materias primas, mezcla también denominada crudo, harina o pasta, cuya composición consta fundamentalmente de óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂) y, en menor medida, de óxidos de aluminio (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃), además de pequeñas cantidades de otros componentes (Sanjuán & Argiz, 2012).

La cal (CaO) se extrae de depósitos calcáreos ricos en carbonato de calcio (CaCO₃) que se encuentran comúnmente en la corteza terrestre en forma de calizas y otros estratos. Este carbonato, a elevadas temperaturas, se descompone en cal y dióxido de carbono (CaCO₃ → CaO + CO₂). El silicio,

el hierro y el aluminio es posible obtenerlos de las arcillas y de otros productos como la escoria de alto horno, que también los contiene, o incluso pueden aparecer en las propias calizas. En ocasiones, para conseguir las proporciones adecuadas de estos materiales no basta con la mezcla de caliza y arcilla o escoria de alto horno, sino que se hace necesario emplear arena silícica, mineral de hierro y caolín, para así corregir los porcentajes de cada componente de la mezcla. La calidad y características del clínker dependerán pues en gran medida de los compuestos mineralógicos de las materias primas y de los porcentajes que poseen de que cada uno de los citados componentes.



Figura 2.4. Fragmentos de clínker y producto final tras la molienda y adiciones: el cemento.

Tras la sinterización del crudo, es decir, de las mencionadas materias primas adecuadamente trituradas y mezcladas, obtenemos el clínker de cemento Portland. Estos materiales homogeneizados se llevan a su temperatura de fusión incipiente, entre 1350 y 1450 °C, en la que parte del material se funde y parte permanece en estado sólido y se producen las

reacciones químicas de clinkerización, tras lo cual se les somete a un brusco enfriamiento. El producto resultante es un material hidráulico que tiene que estar compuesto por silicatos de calcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) al menos en dos tercios de su masa, estando el resto formado por fases de clínker que contienen aluminio y hierro y otros compuestos. Asimismo, la relación en masa (CaO/SiO_2) no ha de ser inferior a 2 y la cantidad de óxido de magnesio (MgO) no será superior al 5,0%. Además, si el clínker va a estar destinado a la producción de cementos resistentes a los sulfatos, tendrá que satisfacer unos condicionantes adicionales en cuanto al contenido de aluminato tricálcico (CEN, 2011).

Tabla 2.1. Composición química del clínker (% en masa)

Fases	Formula	Intervalo	Valor medio
Silicato tricálcico (alita)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	46-79	61
Silicato bicálcico (belita)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	5-30	15
Ferritoaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	4-16	8
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	6-18	12
Cal libre	CaO	0,1-4	1
Periclasa	MgO	0,7-1,5	1.5

Fuente: (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004)

De estos componentes, el silicato tricálcico es el elemento con mayor cantidad de CaO , por lo que será éste el que determine principalmente las propiedades del cemento debido a que, de la hidratación del mismo dependen las características en cuanto a resistencia y durabilidad. La alita endurece con rapidez y proporciona elevada resistencia cuando es finamente molida y es amasada con agua hasta constituir una pasta. Su formación se produce por la reacción entre la sílice y la cal, reacción que se desarrolla más rápidamente en presencia de masa fundida de óxidos de calcio, hierro y aluminio. La periclasa y la cal libre son fases minoritarias y reaccionan con el agua para formar hidróxidos de calcio y magnesio respecti-

vamente, éstos compuestos ocupan un volumen mayor que los óxidos de partida, pudiendo ocasionar expansiones no deseadas, por lo que las normativas limitan su presencia. Por su parte, el aluminato tricálcico reacciona velozmente con el agua, dado su contenido en CaO y mejora la resistencia inicial del cemento (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004).

2.1.3. Otros componentes del cemento

El clínker finamente molido será el principal componente del cemento portland, además de otros componentes que determinarán las características y propiedades del cemento producido. Las composiciones y condiciones de estos materiales se encuentran delimitadas por la normativa vigente para su empleo en el cemento, concretamente la EN 197-1:2011 en el caso europeo. Estos otros componentes son:

- Sulfato de calcio: puede tratarse bien de yeso, es decir, sulfato de calcio dihidratado, bien de hemihidrato, bien de anhídrido o bien de cualquier mezcla de éstos. Este elemento se agrega a los demás componentes del cemento para regular su fraguado (Baracaño Coronas & Pérez Alonso, 1976).
- Escoria granulada de horno alto: este material, que presenta propiedades hidráulicas cuando se activa adecuadamente, se obtiene tras el rápido enfriamiento de una escoria fundida de composición apropiada, producida por la fusión en un horno alto del mineral de hierro y compuesta, cuanto menos en dos tercios de su masa, por escoria vítrea. Así pues, los constituyentes principales de esta escoria son óxidos de calcio (CaO), de magnesio (MgO) y de silicio (SiO₂), además de menores proporciones de óxido de aluminio (Al₂O₃) y otros compuestos (Gutteridge & Dalziel, 1990).

- **Puzolana natural:** las puzolanas son materiales naturales de composición silíceo o silíceo-aluminosa que no tienen la capacidad de endurecer por ellos mismos cuando son amasados con agua, pero que sin embargo, cuando son molidos finamente, reaccionan a temperatura ambiente y en presencia de agua para conformar compuestos de silicato y aluminato de calcio que pueden desarrollar resistencia. La puzolana natural es un material cuyo origen es habitualmente volcánico o que proviene de rocas sedimentarias con una adecuada composición mineralógica y química (Gener & Alonso, 2002).
- **Puzolana natural calcinada:** son materiales provenientes de rocas sedimentarias, pizarras, arcillas o de origen volcánico que son activados por tratamiento térmico.
- **Cenizas volantes silíceas:** las cenizas volantes utilizables en el cemento son obtenidas a partir de la precipitación mecánica o electrostática de partículas pulverulentas presentes en los gases de hornos alimentados con carbón pulverizado. La ceniza volante silíceo es un fino polvo que posee propiedades puzolánicas y está fundamentalmente compuesto por óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3), además de menores proporciones de óxido de hierro y otros compuestos.
- **Cenizas volantes calcáreas:** presentan propiedades hidráulicas y/o puzolánicas y se componen fundamentalmente de óxidos de calcio (CaO), de silicio (SiO_2) y de aluminio (Al_2O_3) además de menores proporciones de óxido de hierro y otros compuestos, estando limitada su expansibilidad para su empleo en el cemento.
- **Esquisto calcinado:** este producto, en particular el bituminoso, se produce en hornos especiales a temperaturas de alrededor de $800\text{ }^\circ\text{C}$. A causa de la propia constitución del material natural y del sistema de fabricación, el esquisto calcinado presenta fa-

ses del clínker, esencialmente silicato dicálcico y aluminato monocálcico. Igualmente contiene dióxido de silicio (SiO_2) y menores porciones de óxido de calcio (CaO) y sulfato de calcio. Consecuentemente, cuando es molido finamente, el esquistó calcinado posee propiedades puzolánicas e importantes propiedades hidráulicas, como el propio cemento.

- Caliza: como componente del cemento, este material debe contener una composición adecuada de carbonato de calcio, de arcilla y de carbono orgánico total, todo ello conforme a las prescripciones de la normativa vigente, tal y como se indicó anteriormente.
- Humo de sílice: se origina en la producción de silicio y sus aleaciones por reducción, en hornos de arco eléctrico, de cuarzo de gran pureza con carbón. Se trata de partículas muy finas con forma de esfera cuyo contenido en dióxido de silicio (SiO_2) es superior al 85%. Si va a ser molido junto al clínker, el humo de sílice puede encontrarse en su estado inicial o bien compactado o paletizado con agua (Holland, 2005).
- Aditivos: son otros elementos cuya cantidad debe ser inferior al 1% de la masa del cemento y que son añadidos para mejorar ciertas propiedades del cemento o facilitar su proceso de fabricación.

En función de la proporción en la que estos componentes aparecen en el cemento, podemos distinguir los distintos tipos de cemento con sus propiedades asociadas.

Tabla 2.2. Productos de la familia de los cementos comunes

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)	Composición (proporción en masa)													Componentes minoritarios adicionales			
		Componentes principales																
		Clínker		Escoria de horno alto		Humo de sílice	Puzolana natural		Puzolana natural calcinada		Ceniza volante silíceo calcáreo		Esquisto calcinado			Caliza		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL									
CEM I	Cemento Portland	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	80-94	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM V	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

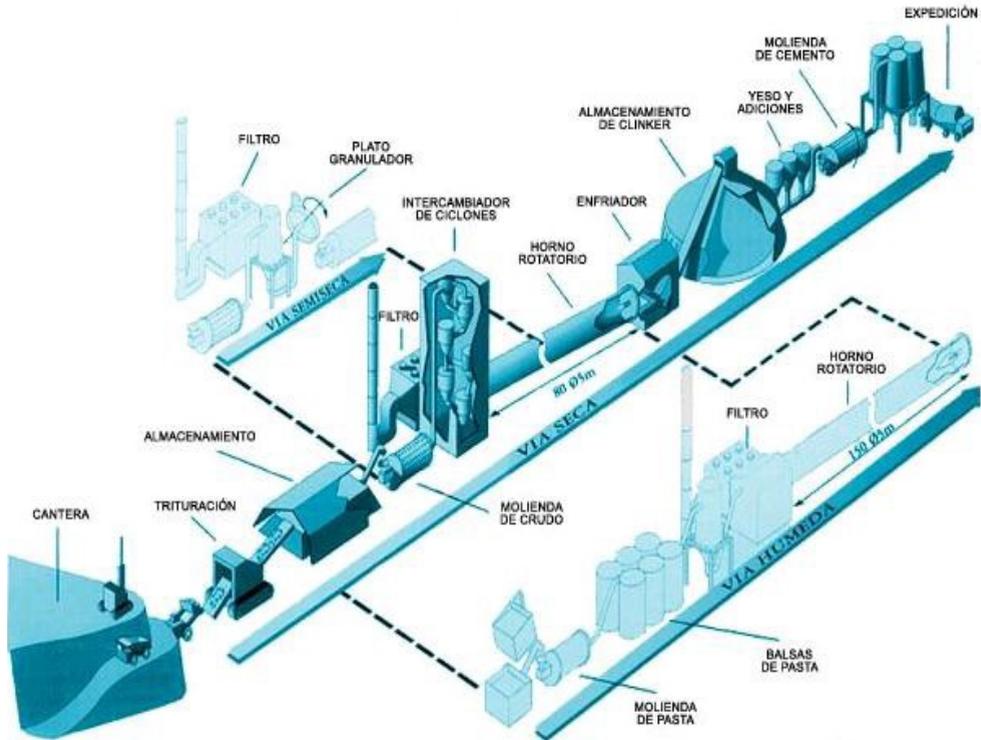
a Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.
 b La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.
 c En los cementos Portland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en los cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clínker se deben declarar en la designación del cemento (véanse los ejemplos en el Capítulo 8).

2.2. Proceso de producción

Hoy en día podemos considerar la producción del cemento portland como una actividad industrial de procesado de minerales, la cual se puede subdividir en cuatro etapas principales (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004):

1. Obtención y tratamiento de las materias primas: esta primera etapa consiste en la extracción de las materias primas (caliza, marga, arcilla, pizarra, etc.), habitualmente obtenidas de canteras y que proporcionan los compuestos minerales que darán lugar al clínker, esto es, carbonato cálcico (CaCO_3), óxido de silicio (SiO_2), óxido férrico (Fe_2O_3) y óxido aluminico (Al_2O_3). Tras su extracción, estos materiales son preparados y molidos, de este modo se consigue una mezcla pulverulenta de los compuestos minerales que es llamada crudo o harina.
2. Clinkerización: En esta etapa se realiza el precalentamiento y posteriormente la sinterización o cocción del crudo en hornos rotatorios hasta llegar a la temperatura adecuada ($1.450\text{ }^\circ\text{C}$), para luego proceder a un enfriamiento brusco y así obtener el material intermedio llamado clínker,
3. Almacenamiento y molienda: El clínker será almacenado para su posterior molido en la propia fábrica o para ser enviado a otras plantas dedicadas a la molienda del clínker, donde es finamente molido junto a otros componentes del cemento, como el yeso (controlador del fraguado) y adiciones como escoria de alto horno, puzolanas, cenizas volantes, etc., para conformar así las diferentes tipologías de cemento.
4. Ensacado y expedición: finalmente el cemento producido se introduce en sacos, recipientes plásticos o *maxibags* para su comercialización. La expedición también puede realizarse a granel, ya sea

mediante camiones o por transporte marítimo, por lo que es frecuente encontrar plantas de fabricación de cemento que incluyen muelles portuarios.



Fuente: OFICEMEN / Rouge, C. & Rivet, R.

Figura 2.5. Esquema del proceso de producción del cemento.

2.2.1. Obtención y tratamiento de las materias primas

El procedimiento de producción del cemento se inicia con la obtención de las materias primas que, fundamentalmente, se hallan en yacimientos naturales. En estas canteras se extraen los materiales por medio de voladuras controladas, cuando se trata de rocas duras como pizarras y calizas, mientras que para las materias blandas, como margas y arcillas, la extracción se realiza por medios mecánicos.

Las cantidades de estas materias primas deben ser las apropiadas en función de la composición mineralógica de dichos materiales. Como se indicó en epígrafes anteriores, la proporción de óxidos necesarios para la producción del clínker se obtiene con una mezcla adecuada de materias primas, podemos distinguir por una parte los minerales mayoritarios y por la otra los correctores de composición, empleados en menores proporciones (Bye, 1999).

- **Minerales mayoritarios:**
 - La caliza representa alrededor del 75 – 80 % del material y suministra el carbonato cálcico (CaCO_3), que una vez calcinado, dará origen al óxido de cal (CaO), emitiéndose dióxido de carbono (CO_2).
 - Las arcillas componen aproximadamente el 20 % del material, siendo necesarias para el aporte de óxidos de aluminio y silicio y, en menores cantidades, de óxidos de hierro.
 - Además las margas presentan una riqueza variable en óxidos y carbonatos, por lo que se añaden en proporciones variables dependiendo de su composición.

- **Correctores de composición:** en función de las propias características de los yacimientos de origen las materias primas, puede resultar preciso ajustar los componentes de dichas materias adicionando unos pro-

ductos denominados correctores, habitualmente en porciones mucho más reducidas que los materiales mayoritarios.

- La corrección del contenido en cal se realiza mediante calizas de alta pureza.
- La proporción de sílice se regula habitualmente con arena silícea.
- El porcentaje de hierro es ajustado con el suministro de productos ricos en hierro, como cenizas de pirita.

Además, en la actualidad la industria del cemento está buscando soluciones a para desarrollar cementos cuya fabricación es menos perjudicial para el medio ambiente y con una menor tendencia a emitir gases contaminantes. Una forma de alcanzar este objetivo es el uso de residuos industriales y subproductos como materiales alternativos para la fabricación de cemento. Tales materiales alternativos pueden reemplazar parcialmente a las materias primas convencionales, como por ejemplo residuos cerámicos (Goñi, Guerrero, Macias, Peña, & Fernández Escalante, 2008), suelos contaminados (Navia, Rivela, Lorber, & Méndez, 2006), escorias siderúrgicas (Monshi & Asgarani, 1999), cenizas provenientes de la incineración de residuos sólidos urbanos (Pay-Haung, Juu-En, & Li-Choung, 2003), o barros rojos provenientes de la industria del aluminio (Singh, Upadhayay, & Prasad, 1996).

2.2.1.1 Tratamientos primarios

Una vez obtenido y clasificado las materias primas, es triturado con el fin de obtener una granulometría apropiada para la posterior molienda y es trasladado a la planta, para el acopio previo a la homogeneización. En función de las características de las materiales y de del estado en el que llegan a la fábrica de cemento, pueden der sometidos a diversos tratamientos primarios (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014), como:

- Harneado o cribado: cuyo cometido separar los fragmentos de mayores dimensiones que pudieran dificultar el correcto funcionamiento de la maquinaria.
- Disminución de tamaño: esta disminución, por medio de chancadores, se realiza, en caso de ser necesario, para que el material que llega al molino presente un tamaño adecuado.
- Prehomogeneización: este tratamiento tiene por objeto la obtención de unas materias primas homogéneas en su estado granular.
- Secado: para reducir la porción de agua que presentan los materiales hasta valores factibles para el buen funcionamiento de los procesos y equipos.
- Concentración de carbonato: se efectúa si los productos calcáreos presentan un bajo contenido de carbonato, gracias a sistemas de flotación el carbonato de calcio es separado del resto de los compuestos del material.
- Clasificación según propiedades físicas o composición química: normalmente, estas materias primas son separados en zonas conforme a sus características físicas.

2.2.1.2 Molienda

La mezcla de materias primas habitualmente se traslada mediante cintas transportadoras al siguiente paso, en el que se procede a la molienda de estos materiales, que tiene por objeto reducir sus dimensiones a un estado pulverulento, denominado harina o crudo, de tal forma que se posibiliten y optimicen las reacciones químicas que se desarrollan durante la clínkerización (Li, Yu, & Yuan, 2012), y puede efectuarse en húmedo (vía húmeda) o en seco (vía seca).

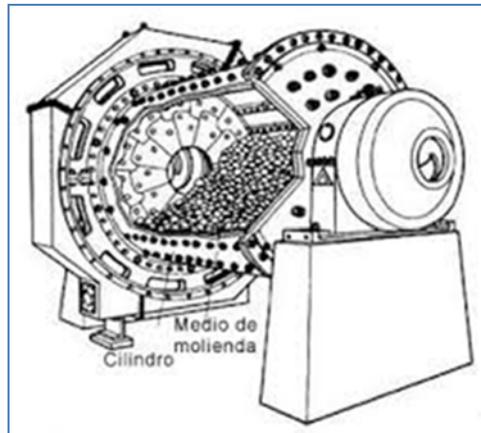


Figura 2.6. Corte esquemático del molino de bolas.

Esta molienda se realiza mediante equipos de disminución de tamaño por percusión o por compresión. Si los materiales se presentan en forma de barro, o si es necesario concentrar el carbonato, se utiliza la vía húmeda, que consiste en licuar las materias en grandes depósitos circulares provistos de peines giratorios. Posteriormente, los materiales se trasladan a molinos de bolas, para así obtener una pasta fluida que a continuación es prensada para reducir el contenido en agua y se almacena en forma de nódulos hasta que es introducida en el horno. En caso de emplear la vía seca, la molienda se efectúa por medio de molinos de rodillos o de bolas, consiguiéndose así un fino polvo de tamaño inferior a 150 micrómetros. Es habitual que los molinos de vía seca dispongan de mecanismos que inyecten aire caliente para secar las materias primas, paralelamente al desarrollo del molido. Los gases calientes del propio horno, antes de ser filtrados y emitidos a la atmósfera a través de la chimenea, se hacen pasar a través de los equipos de molienda y clasificación, con el fin de secar las materias primas y mejorar el rendimiento del horno.

Tras la molienda, según del tamaño de sus partículas, el producto obtenido se clasifica en separadores con objeto de reenviar la fracción gruesa nuevamente al molino, mientras que el material de tamaño adecuado se envía a los silos de acopio anteriores a la alimentación del horno.

2.2.1.3 Homogeneización

En la homogeneización se mezclan los diferentes materiales, de modo que, en cualquier parte de la mezcla que se observe, los componentes han de estar presentes en las cantidades previstas. En el caso de la vía húmeda se emplean depósitos con agitadores mecánicos, mientras que para la vía seca se utilizan silos, en los que el crudo es agitado gracias a la inyección de aire a presión.

La correcta homogeneización de los materiales posibilita corregir las dosificaciones, lograr un funcionamiento adecuado del horno y mantener la calidad del clínker (Moussaceb & Merabet, 2012). En cambio, una deficiente homogeneización puede conducir a clínker defectuoso, cometer errores en los cambios de dosificación, entorpecer la operación del horno y dificultar las reacciones químicas que dan lugar clínker.

En el proceso de producción del cemento, el equipo más delicado y costoso es el horno. Su funcionamiento a elevadas temperaturas y su revestimiento refractario precisa un funcionamiento continuo. Por ello, se hace necesario prever silos para el almacenamiento de crudo, de forma que la continuidad en la operación del horno quede asegurada, sin que paradas del molino de crudo afecten a la producción. El volumen de estos silos se proyecta de tal manera que el horno pueda continuar funcionando unos 10 días tras la eventual parada del molino de crudo.



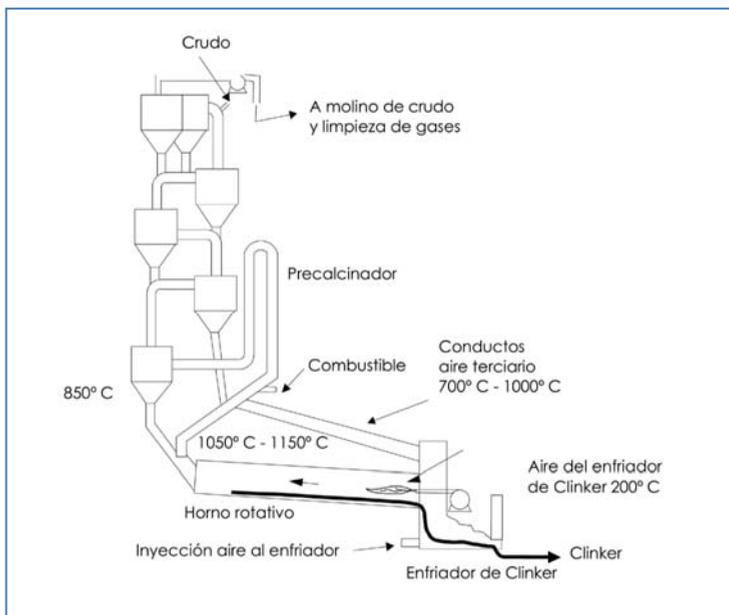
Figura 2.7. Parque de homogeneización.

2.2.2. Clinkerización

La calcinación o clinkerización es un proceso termoquímico que supone la etapa más relevante del procedimiento de producción del clínker. Los productos homogeneizados son calentados hasta alcanzar la temperatura de fusión incipiente (alrededor de 1.450 °C), cuando una porción del material se funde mientras que el resto se mantiene en estado sólido, de tal modo que se producen las reacciones químicas que permiten la formación de los compuestos mineralógicos del clínker (Kacimi, Simon-Masseron, Ghomari, & Derriche, 2006). Tras la salida del horno, el clínker pasa al enfriador, donde se introduce aire frío desde el exterior para así disminuir su temperatura de 1,400°C a unos 100°C. El aire caliente originado en este equipo es de nuevo introducido en el horno para mejorar la combustión, favoreciendo así la eficiencia energética del proceso.

Se aplican hasta cuatro tipos diferentes de procedimientos de fabricación del clínker, en función del modo en el que el material es procesado

antes de la entrada en el horno: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda o vía húmeda (Hernandez, Quiroz, & Ortiz Valencia, 2014). En el procedimiento por vía seca, los materiales son introducidos de forma seca y pulverulenta. La alimentación del horno es efectuada por medio de una torre de ciclones de diversas etapas (habitualmente de 4 a 6), en esta torre se produce un intercambio de calor que precalienta el crudo al entrar en contacto con los gases procedentes del horno rotatorio. En ocasiones se incorpora una cámara de combustión en la que se quema parte del combustible, denominada precalcificador, de modo que se logra que el proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) se haya prácticamente completado antes de la entrada al horno.



Fuente: (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014)

Figura 2.8. Precalentador de ciclones.

La técnica de vía húmeda se emplea cuando las materias primas tienen un alto contenido en humedad, en este caso se acondiciona el material de alimentación por medio de una molienda húmeda, de modo que la pasta obtenida presenta un 30 – 40 % de contenido de agua y es suministrada en el extremo más elevado del horno inclinado. Asimismo, en el área de secado del horno, se colocan cadenas para optimizar el intercambio de calor entre la pasta y los gases. En la fabricación por la vía semi-seca y semi-húmeda, el producto de alimentación se consigue agregando o eliminando agua mediante filtros prensa. De este modo se conforman unos gránulos cuyo contenido en humedad ronda el 15 – 20 %, estos gránulos se disponen en parrillas móviles y son precalentados por los gases procedentes del horno que se hace pasar a través de dichas parrillas. La industria del cemento ha llevado a cabo una importante renovación de equipos en los últimos tiempos, reemplazando los antiguos sistemas de vía húmeda por de vía seca, ya que éstos presentan una mayor eficiencia energética. Hoy en día, alrededor 78 % de la elaboración de cemento en Europa se efectúa con equipos de vía seca, un 16 % se produce mediante hornos de vía semi-seca o semi-húmeda y aproximadamente el 6 % utiliza la vía húmeda (Cedano de León, 2012).

Así pues, en el procedimiento de formación de clínker, podemos distinguir cuatro etapas diferenciadas:

- **Pre calentamiento y deshidratación (20 – 900 °C):** que consiste en precalentar y secar las materias que conforman el crudo, produciéndose el desecado o eliminación del agua libre y la deshidratación, es decir, la pérdida del agua combinada.
- **Calcinación / descarbonatación (600 – 900 °C):** comienzan las reacciones y se da lugar a los minerales y fases intermedias, que más tarde terminarán formando el clínker. La caliza (CaCO_3) se descompone en óxido cálcico (CaO) y dióxido de carbono (CO_2) y se producen silicatos de cálcico, gracias a la reacción endotérmica en-

tre la sílice y el óxido de calcio que aparece en dicha descomposición de la caliza.

- Clinkerización o sinterización (1.250 – 1.450 °C): Se produce el silicato tricálcico debido a la reacción exotérmica entre el óxido de calcio y el silicato dicálcico y se da lugar a la aparición aluminatos y ferroaluminatos de calcio.
- Enfriamiento (1.350 – 1.200 °C): Se produce en el interior del horno y da lugar a la cristalización del aluminato cálcico y del ferrito cálcico.

Inmediatamente después de la salida del horno, el clínker producido se enfría en intercambiadores de calor para impedir la descomposición de sus compuestos principales.

2.2.2.1 Precalentador

Con el fin de reducir la dimensión del horno y sacar partido del calor de los gases, los modernos hornos actuales presentan torres de precalentamiento con ciclones, por los que baja el crudo y ascienden los gases calientes, facilitando un contacto directo aire - sólido entre los gases y la harina de alimentación.

En función de las temperaturas que adquiere el material antes de su entrada en el horno, estas torres se llaman precalentadores (el crudo llega a temperaturas de hasta 700 °C) o precalcinaoadores (del crudo alcanza temperaturas superiores a 1.000 °C). Así pues, el material sufre diferentes transformaciones conforme desciende por las torres y avanza por el horno (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014):



Figura 2.9. Torre del precalentador de ciclones.

2.2.2.2 Hornos rotatorios

La clinkerización de los materiales se efectúa en hornos rotatorios. Estos equipos consisten en tubos metálicos situados sobre polines, son de acero y se revisten en su interior con material refractario. Se montan de modo que presentan una inclinación de entorno al 3 - 5%, su accionamiento se realiza mediante motores que giran a una velocidad de rotación de alrededor de 10 metros por minuto. Su tamaño, diámetros de entre 2m y 6m y longitudes de 50m a 200m, será función de la capacidad de producción prevista. Para la combustión se puede emplear carbón pulverizado, petróleo, o gas, que es introducido junto con aire en la zona inferior del horno, en la que tiene lugar la combustión.

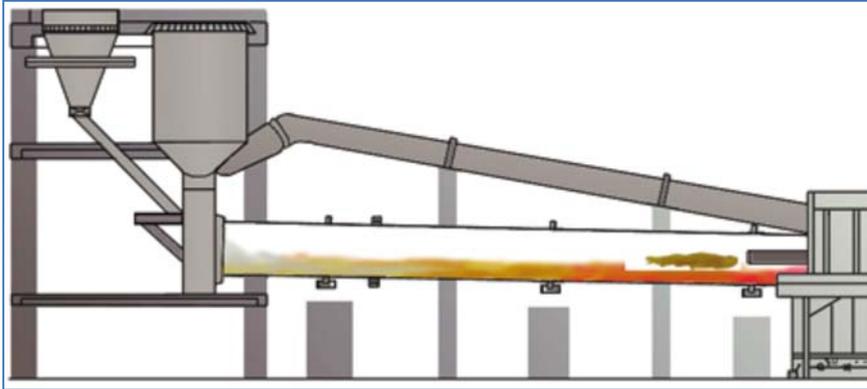


Figura 2.10. Esquema del horno de clínker.

Los materiales son introducidos por la zona superior y, debido a la rotación y pendiente del horno, van avanzando paulatinamente, situándose en zonas cada vez con mayor temperatura, hasta alcanzar el lugar de la llama, en el que tiene lugar la clinkerización. Los gases a alta temperatura generados discurren por todo el horno y se envían hacia la chimenea, previo paso por los elementos de recuperación del calor y de filtración del polvo. Así pues, junto al propio horno es necesario disponer otros sistemas:

- Equipos de alimentación, que permiten regular la cantidad de material crudo que se introduce en el horno.
- Equipos de preparación e inyección del combustible.
- Equipos para la recuperación de calor de los gases.
- Equipos para la filtración del polvo que contienen los gases.

2.2.2.3 Enfriadores

El clínker ha de ser enfriado de forma rápida tras su salida del horno (Keil, 1973), para así impedir la descomposición del silicato tricálcico, en óxido de calcio y silicato bicálcico: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{CaO}$.

La bajada de temperatura se consigue introduciendo aire en los equipos de enfriamiento, de modo que el clínker salga de ellos a temperaturas por debajo de 150 °C. Estos enfriadores pueden ser presentar diferentes tipologías:

- De tubo rotativo.
- De satélites o planetario.
- De Parrilla.



Figura 2.11. Enfriador de satélites.

Asimismo, en el enfriador se aprovechará el calor del clínker a alta temperatura que sale del horno, puesto que aire empleado para el enfriamiento recuperará calor del clínker y este aire será utilizado empleado en la combustión en el horno.

2.2.2.4 Almacenamiento del clínker producido

El clínker así fabricado se acopia durante algún tiempo, antes de ser enviado a la molienda, de modo que acaba de enfriarse. Este almacenamiento ha de efectuarse en zonas libres de contaminantes que puedan afectar al clínker, igualmente la presencia de agua puede producir una parcial hidratación de sus componentes. En la industria actual se adoptan estructuras cerradas con elevadas capacidades de almacenamiento, las diferentes tipologías y sistemas empleados se analizan con mayor profusión en el siguiente capítulo del presente documento.



Figura 2.12. Almacenamiento de clínker, Cementos Bocaya (Colombia).

2.2.3. Molienda, almacenamiento y expedición

La siguiente fase en el proceso de producción del cemento concierne a la molienda del clínker, donde se pretende reducir el clínker, yeso y otras adiciones a un fino polvo, con partículas de tamaño inferior a 100

micrómetros. Esta fase puede desarrollarse en la misma planta industrial en la que se ha producido el clínker o bien en instalaciones exclusivas para la molienda y expedición de cemento, a las que el clínker producido en otras plantas llega a granel.

Para llevar a cabo la molienda se emplean molinos de bolas, son de acero y constan de dos o tres compartimentos en los que introducen unas bolas también acero que ocupan alrededor de la tercera parte del volumen del molino.



Figura 2.13. Molienda del clínker.

El equipo rota y mueve las bolas de acero, que chocan entre ellas y contra laterales del molino, aprisionando los materiales y ocasionando de este modo su trituración hasta convertirlos en polvo. En las cámaras de estos equipos se incluyen bolas de diferentes dimensiones, dependiendo de la granulometría del producto. En el primer compartimento se introducen bolas de tamaño mayor, en cambio en la última, denominada de refino, se llena con bolas o con cilindros de acero de reducidas dimensiones.

Para el traslado del cemento se recurre habitualmente a sistemas neumáticos. Tras la molienda, el cemento producido es acumulado en silos. Éstos poseen sistemas auxiliares para conservar el cemento en agitación y de este modo prevenir que los granos gruesos se segreguen por decantación o la aglomeración del producto. En estos silos, es posible almacenar el cemento durante algunos meses sin que su calidad se vea mermada.



Figura 2.14. Silos de cemento.

La expedición del cemento se puede realizar en sacos o a granel. Estos sacos de papel o polipropileno han de satisfacer los requisitos impuestos en la normativa al respecto (RC-08, 2008). Hoy en día se emplean también depósitos de plástico o fibra, llamados maxisacos o Big Bag. Asimismo, el traslado a granel se realiza tradicionalmente en recipientes metálicos, que en caso de ser herméticos son descargados mediante la inyección de aire, o bien en contenedores que son descargados por volteo.

En ocasiones la expedición a granel se realiza por vía marítima, ya sea del cemento producido o del propio clínker para ser enviado a otra planta dedicada a su molienda. Por ello resulta frecuente encontrar instalaciones portuarias anexas a las industrias de fabricación de cemento.



Figura 2.15. Muelle de la planta de Cemex Alcanar (Tarragona).

El diagrama de bloques representado en la figura 2.16 resume las etapas del proceso de producción del cemento descrito en el presente capítulo.

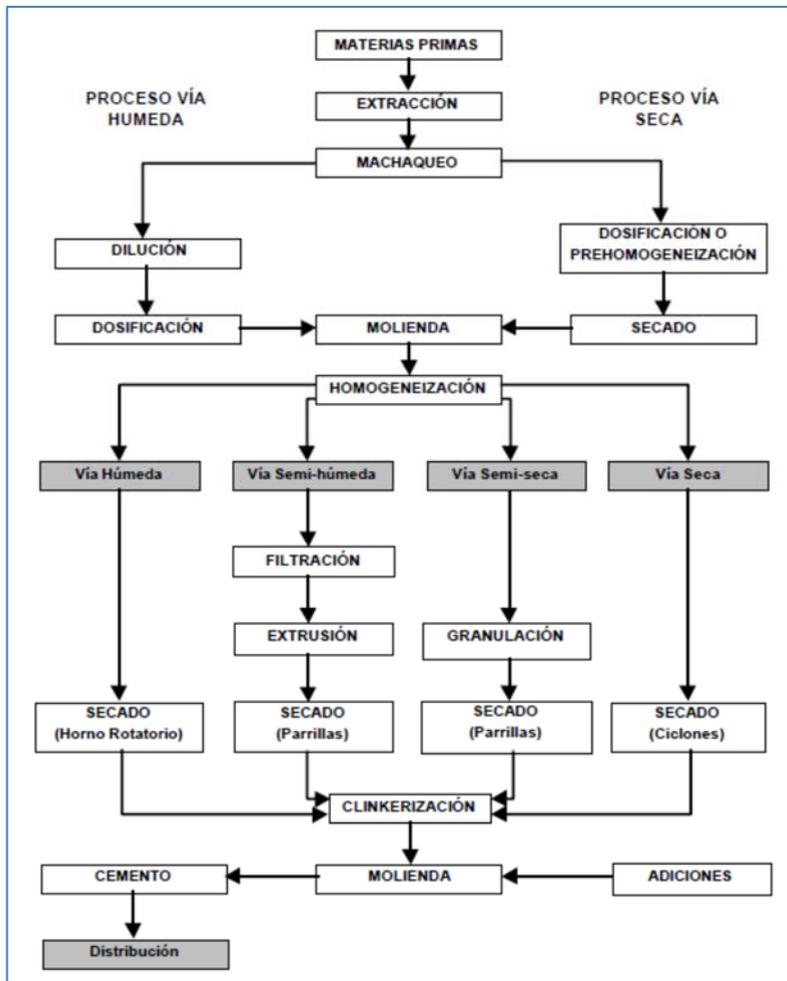


Figura 2.16. Diagrama de bloques del proceso de fabricación del cemento.

Capítulo 3

Sistemas de almacenamiento del clínker

Las grandes estructuras de almacenamiento de materiales juegan un importante papel en el proceso de producción del clínker y del cemento, asegurando una adecuada gestión de las materias primas y productos intermedios, así como el almacenamiento del producto final. Estos silos son esenciales para manejar las fluctuaciones entre el suministro de materiales y su implementación en el proceso productivo o las fluctuaciones entre la demanda del producto final y sus niveles de producción. Así pues, la correcta elección de un adecuado sistema de almacenaje tendrá un impacto significativo tanto en el control del proceso productivo como en los beneficios económicos obtenidos. En el caso concreto de la producción del clínker en la industria cementera, estos sistemas son necesarios para el almacenamiento y gestión del material desde su producción en el horno hasta su envío a la molienda de cemento.

Hoy en día son factibles varios métodos para el almacenamiento de graneles sólidos, éstos incluyen almacenes abiertos, almacenes cubiertos, almacenamiento en silos, domos, etc. La selección del tipo de almacenamiento se regirá por los requisitos de capacidad, características del material, propiedades del terreno, condicionantes ambientales, otros requisitos del proyecto como métodos de llenado y descarga, disponibilidad de sistemas mecánicos adecuados para su operación, etc. En la actualidad podemos observar numerosas investigaciones encaminadas a optimizar el dimensionamiento estructural para estos grandes silos, determinar con exactitud las presiones ejercidas por el material almacenado o establecer los equipos mecánicos empleados para operar el producto (Sadowski & Rotter, 2013) (Hillewaere, Degroote, Lombaert, Vierendeels, & Degrande, 2013) (Zhao, Cao, & Su, 2013). Sin embargo, encontramos un importante vacío en lo referente a la elección de la tipología de almacenamiento más apropiada en caso concreto, como paso previo y fundamental al diseño óptimo de estos almacenes.

La Directiva 2010/75/UE referente a las emisiones industriales, establece normas sobre la prevención y control integrado de la contaminación que emana de actividades industriales. Por otro lado, de acuerdo con el Reglamento CE nº 1272/2008, el polvo de clínker difuso generado en las grandes instalaciones de almacenamiento es perjudicial para la salud humana, ya que puede causar irritación y lesiones.

En 2013, la Decisión de la Comisión Europea 2013/163/UE establece las mejores técnicas disponibles con arreglo a la mencionada Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales en la producción de cemento. Para el almacenamiento de clínker, los silos de clínker y las áreas de almacenamiento de materias primas totalmente cerrados y automatizadas se consideran la solución más eficaz al problema de polvo difuso generado durante las operaciones de llenado.

Hay varias soluciones de forma cerrada que alcanzan las recomendaciones de estas Directivas, según el Joint Research Center (European Commission, 2013) las mejores técnicas disponibles para la industria del cemento que se aplican hoy en día para las capacidades de almacenamiento comúnmente proyectadas son: el Silo Cilíndrico (RCS, *Round Clinker Silo*); Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (LSG, *Longitudinal Store with Gravity Discharge*); El Depósito Circular con descarga por gravedad (CSG, *Circular Store with Gravity Discharge*) y el Silo Domo (CSD, *Clinker Storage Dome*). Así pues, el responsable del proyecto deberá elegir el edificio de almacenamiento óptimo entre estos cuatro sistemas. La figura 3.1 muestra los esquemas de estas instalaciones cuyas ventajas y desventajas son analizadas posteriormente.

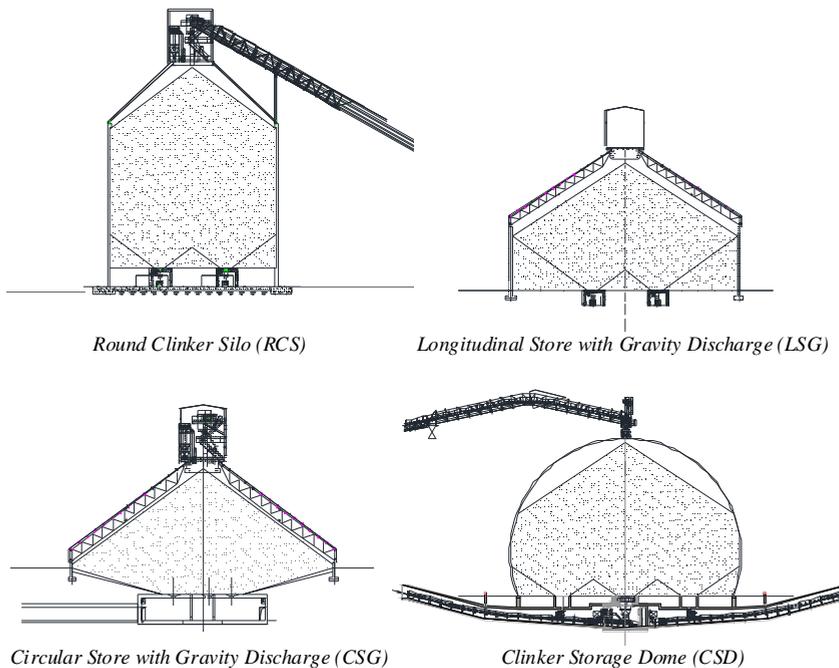


Figura 3.1. Mejores sistemas disponibles para el almacenamiento de clínker.

- El Silo Cilíndrico (RCS) es un depósito cilíndrico vertical, cuyas paredes están construidas con hormigón postesado para las capacidades de almacenamiento habitualmente manejadas en la producción de cemento. La alimentación del clínker se realiza a través de la cubierta metálica, mientras que la descarga se lleva a cabo por gravedad a través de túneles de extracción equipados con transportadores. Este sistema permite una alta capacidad de almacenamiento vivo y requiere buenas características del suelo. Problemas por vibraciones pueden aparecer durante la descarga del clínker en determinadas ocasiones (Liu, Wu, & Wang, 2013).
- En el Almacén Longitudinal (LSG) el material a granel se coloca en el suelo en pilas prismáticas alargadas. Hoy en día, el almacenamiento de clínker en estructuras cerradas es más habitual debido a las restricciones de emisiones ambientales (Elzea Kogel, Trivedi, & Krukowsk, 2006), por lo tanto, es necesario prever cubiertas y fachadas cerradas para almacenar el material. El material se carga con un apilador lateral, o por una banda móvil desde arriba. Para retirar el material, podemos utilizar túneles de extracción o un recuperador mecánico con raspadores. Este sistema de almacenamiento a menudo tiene mayores costes de inversión que otras soluciones.
- El Almacenamiento Circular (CSG) es la solución más sencilla para almacenar los materiales en forma de granel (Anonymous, 2012). En la depósito circular, clínker se almacena en una pila cónica y es extraído a través de túneles subterráneos con tolvas y transportadores. Dado que la altura de caída del material es considerable cuando se almacena en una pila cónica, se producen grandes cantidades de polvo si no está cubierto. Una estructura metálica se debe construir generalmente para encerrar el material. Este sistema permite una alta capacidad de almacenamiento vivo.

- El Silo Domo (CSD) también se utiliza en la actualidad para almacenar el clínker. En comparación con otros sistemas, el silo domo presenta el mayor volumen en relación a la superficie ocupada (Sambashivan, 2011). La base de este tipo de silo es plana; la estructura de la construcción presenta un perfil que se aproxima a la forma de la reserva, por lo que comúnmente se prefiere el perfil parabólico. Esta es una manera económica de almacenar y la cúpula también puede ser soportada sobre un muro perimetral de hormigón para aumentar su capacidad de almacenamiento.

3.1. Depósito circular

El almacenamiento de materiales a granel en una depósito circular podemos decir que es el sistema más simple de acopio (Sambashivan, 2011), el material es vertido desde la parte superior, formando una pila cónica en función de su ángulo de rozamiento interno. Las características más destacadas del almacenamiento circular cubierto, con o sin una columna central, son su baja altura y gran diámetro. La estructura del techo presentará una inclinación similar al ángulo de rozamiento interno del material y puede contar con un muro de contención circular en su parte inferior.



Figura 3.2. Depósito circular de clínker, Tula (Méjico).

En caso de existir, la columna central está provista de aberturas de salida en forma de ranura y soporta la estructura simple techo, que consiste en la estructura de acero y el revestimiento mediante chapas trapezoidales. La plataforma que se sitúa en la parte más alta de la cubierta está diseñada para recibir el puente transportador con el equipo de transporte y el sistema de filtro.

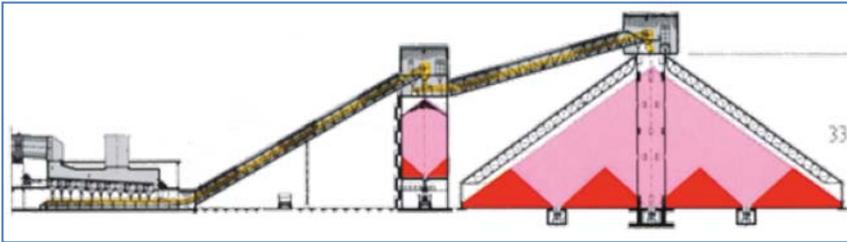
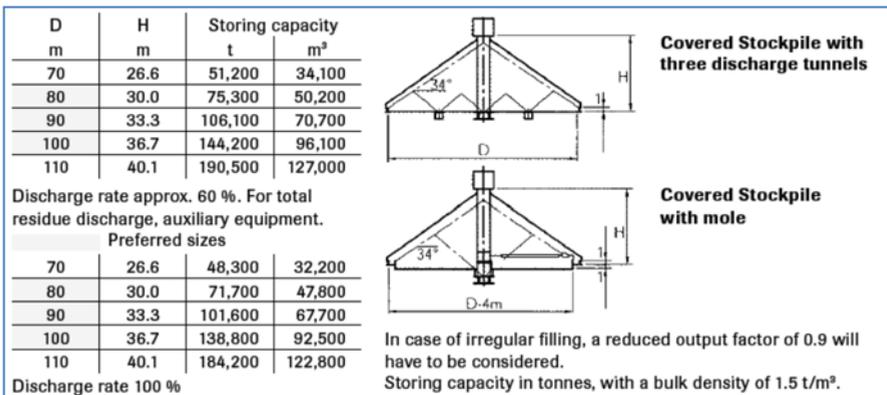


Figura 3.3. Esquema de un depósito circular para el almacenamiento de clínker.

En este sistema, se alcanzan ratios de descarga del 40% a 60% mediante la instalación de uno a tres túneles de descarga por gravedad. Para la descarga total del material, se requerirán sistemas de evacuación móviles. Los diámetros de estos sistemas para los volúmenes de almacenamiento estándar se encuentran en el intervalo de 70 a 110 m., pudiendo llegar a capacidades de almacenamiento de entre 40.000 y 190.000 t. Mayores capacidades de almacenamiento se han conseguido mediante la combinación de dos salas de almacenamiento circulares, este sistema especial alcanza capacidades del orden 230.000 t.



Fuente: Aumund

Figura 3.4. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker de un depósito circular.

El depósito circular puede también aumentar su capacidad mediante la construcción de un muro perimetral. De este modo, se ejecuta un cilindro de hormigón armado pretensado con un diámetro de 40 a 80 m y una altura de 10 a 25 m. Una estructura de cubierta en forma de cono se dispone sobre el muro de hormigón, este techo está comúnmente formado por una estructura de acero autoportante cubierto con placas trapezoidales. Elementos especiales de sellado en las uniones de las placas trapezoidales hacen que la estructura de la cubierta estanca al polvo. Para la compensación de las tensiones térmicas, la estructura la cubierta está apoyada sobre cojinetes de deslizamiento especiales que se instalan en el borde superior del cilindro de hormigón.

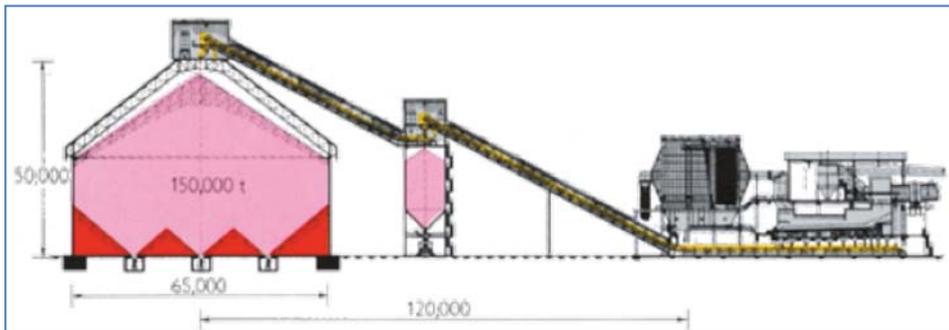
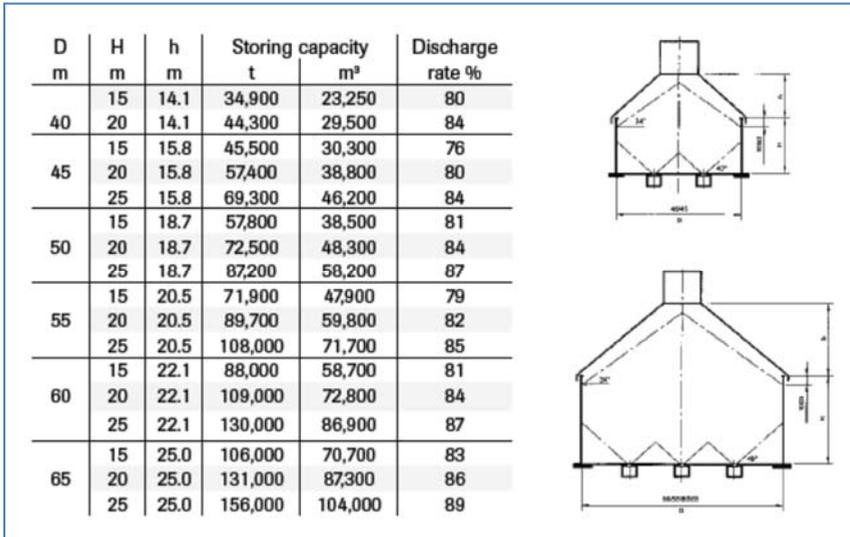


Figura 3.5. Esquema de un depósito circular con muro perimetral.

La capacidad de almacenamiento de estas salas de almacenamiento circulares va desde 50.000 a 250.000 t., pudiéndose realizar para capacidades aún mayores. Debido a la reducida altura del sistema y el gran diámetro, también es posible la construcción de estas salas de almacenamiento circulares en los suelos con escasa capacidad portante, requiriéndose un mínimo de aproximadamente 500 kN/m². El material se descarga por medio de dos a cuatro túneles de descarga, dependiendo del diámetro del almacenamiento, lográndose un ratio de descarga de alrededor del 85%.



Fuente: Aumund

Figura 3.6. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker de un depósito circular con muro perimetral.

La estructura de la cubierta soporta un casetón, donde se instala el área principal de operaciones, con la estación de control del transportador de alimentación y los sistemas de filtro para la eliminación de polvo del almacén de clínker. Las dimensiones de este casetón superior vendrán condicionadas por el tamaño de estos sistemas mecánicos. En función del diámetro del almacén circular de clínker, se estandarizan las principales dimensiones de la estructura del techo y el área principal de operaciones.

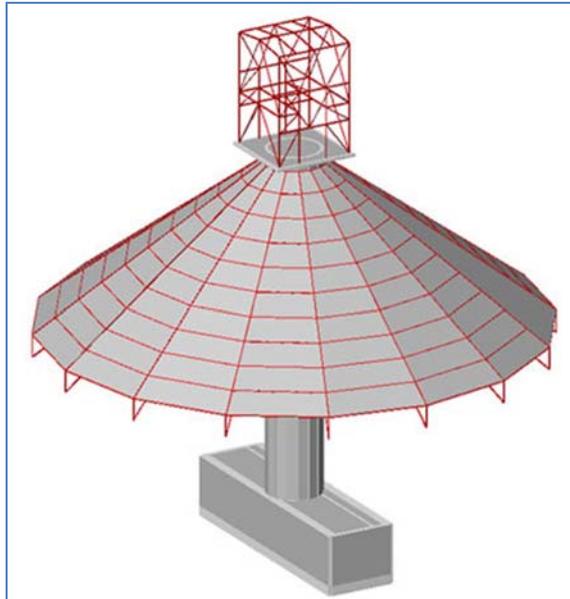


Figura 3.7. Cubierta metálica y casetón superior.

Durante el proceso de carga, el clínker segrega y forma conos de acuerdo con el tamaño de partícula. Una mezcla homogénea de clínker es, sin embargo, condición esencial para el buen funcionamiento de los molinos de cemento. Por lo tanto, se recomienda cambiar sistemáticamente las puertas de descarga de silo con el fin de mezclar los diferentes tamaños de partículas en el silo. Además, el cambio regular de las aberturas de descarga asegura que el nivel de clínker almacenado en el silo disminuya uniformemente, evitando así una temprana salida del clínker recién producido.

La capacidad de acopio de los sistemas de almacenamiento de clínker longitudinal y circular se puede aumentar considerablemente mediante la excavación de un cono de tierra. El cono inferior se proporciona generalmente con una inclinación de 40° a 45° . Además, de este modo el ratio de descarga se mejora considerablemente.

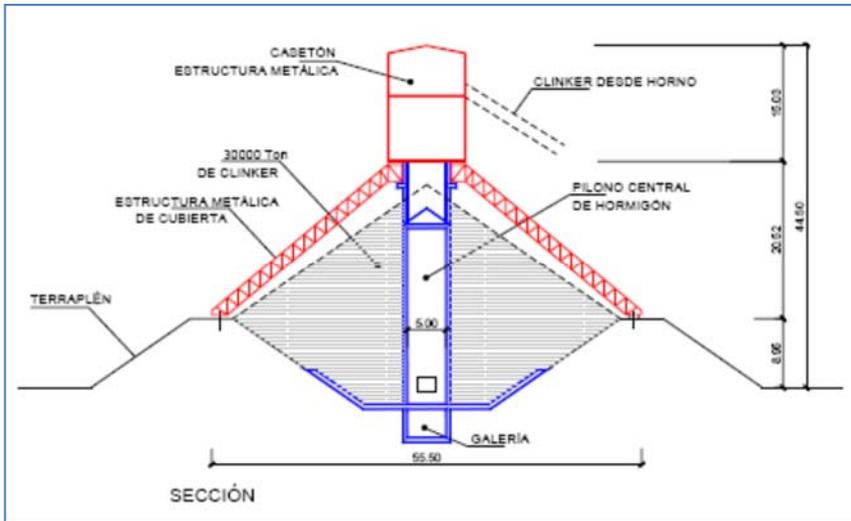


Figura 3.8. Sección tipo de un depósito circular con cono inferior.

Para el cono inferior, conservar la superficie del terreno con un simple tratamiento superficial ha demostrado no ser una solución adecuada. Tanto los niveles de agua subterránea como el agua de la superficie pueden penetrar en el cono de la tierra a través de fisuras y huecos. Así pues, la superficie del cono debe ser revestida mediante una losa de hormigón. También se recomienda instalar un sistema de drenaje con el fin de garantizar que las acumulaciones de agua pueden fluir fuera. Para el techo y área principal de operaciones, se prefiere una estructura de acero con revestimiento trapezoidal, del mismo modo que para salas de almacenamiento circulares sin una columna central. La descarga del clínker del cono tierra se efectúa a través de aberturas de descarga centrales. Por razones de seguridad, se deben prever al menos tres dispositivos de descarga para el silo.

Estas salas de almacenamiento de clínker también pueden ser equipados con una columna central, que luego se utiliza para el almacenamiento de clínker especial. Se requerirá un canal de alimentación giratorio para

la alimentación de la torre central, así como para la alimentación simétrica de la sala de almacenamiento principal.

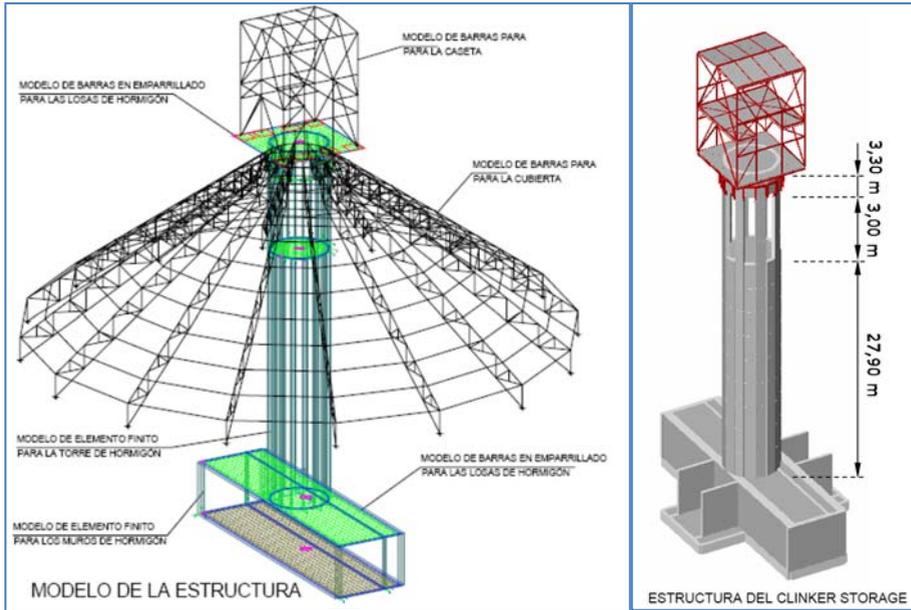


Figura 3.9. Esquema estructural de un depósito circular.

3.2. Silo cilíndrico

Un silo es una construcción empleada para el almacenamiento de productos granulares o pulverulentos. Habitualmente se emplea el término silo para denominar cualquier estructura de almacenamiento como depósitos, tanques o almacenes. Sin embargo, estrictamente el silo es una estructura que presenta una relación área/altura tal que se produce el “efecto silo”, es decir, el producto almacenado roza con las paredes del silo, transmitiéndole parte de su peso por el rozamiento, reduciendo así la presión vertical, y a su vez, también los empujes (Ayuga, 1995). Así pues, se produce una interacción entre el material y la pared que depende de las características del producto ensilado, densidad y ángulo de rozamiento, y del ángulo de fricción de la superficie de la propia estructura.

Este concepto cambió el concepto del cálculo de silos, que anteriormente se basaba en los empujes hidrostáticos del material, y permitió optimizar el diseño de estas estructuras de almacenamiento. Además es necesario considerar los fenómenos que se producen en el interior de un silo durante el llenado o durante el vaciado, complejos y difíciles de captar por las leyes simples. Para determinar los empujes del material, durante mucho tiempo se aplicó la llamada fórmula de Janssen-Koenen (1895) antes de que los resultados experimentales mostrasen que algunos de los supuestos adoptados por Koenen no eran correctos. Durante los años cuarenta los hermanos Reimbert efectuaron importantes contribuciones en este sentido y desarrollaron una nueva teoría de cálculo que se hizo muy popular (Reimbert, 1943). La teoría silos dio un paso decisivo en 1956, cuando Caquot y Kerisel demostraron por primera vez la necesidad de considerar dos estados distintos de las tensiones en la pared, una para el llenado y otra para el vaciado (Caquot & Kerisel, 1956), y en 1964 con la publicación de la norma alemana DIN 1055-1 y - 6, que resumía y reflejaba el bagaje de conocimientos adquiridos hasta entonces.

En la década de los ochenta se revisaron prácticamente todas las normas internacionales, incorporando los últimos avances técnicos. Se produjo una vuelta a la teoría estática de Janssen, generalizada y complementada con los trabajos posteriores. Estas publicaciones proporcionan un dominio de definición del silo, un método de cálculo de la presión sobre las paredes, y los valores numéricos convencionales para los parámetros que caracterizan los productos comúnmente ensilados y los coeficientes que deben tenerse en cuenta en función de la naturaleza de la pared del silo. Desde entonces, el método de los elementos finitos se ha convertido en una importante línea de investigación para el diseño de los silos, unida al estudio de las características de los materiales ensilados (Zhao, Cao, & Su, 2013).

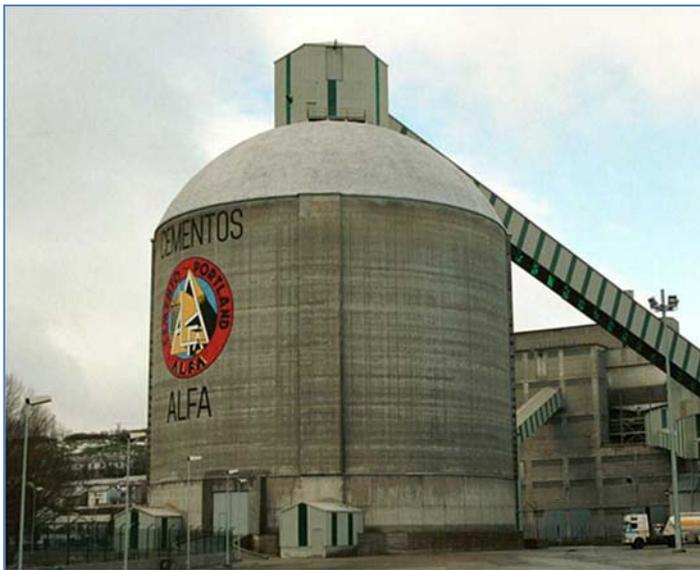


Figura 3.10. Silo cilíndrico para clínker.

En el caso concreto del clínker, la aplicación de estos almacenes cilíndricos verticales permite reducir las superficies ocupadas para el *storage* de una determinada cantidad de producto. Estos silos son habitual-

mente de hormigón postesado o en ocasiones de acero especial. Debido a la base comparativamente pequeña, se alcanza una alta tasa de descarga de aprox. 75% por medio de un solo transportador de descarga. Esto implica que la práctica totalidad del material almacenado en el silo puede ser extraído en gran medida por la descarga por gravedad, sin necesidad de utilizar sistemas de evacuación móviles.

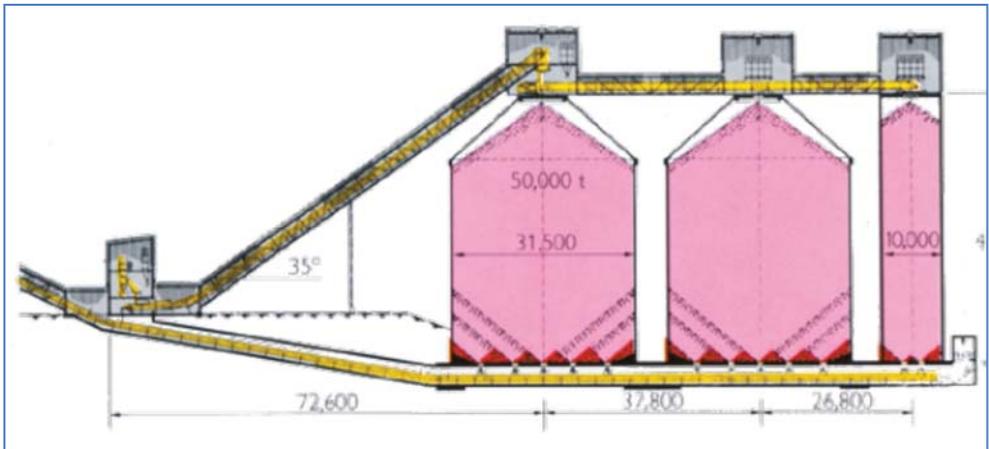
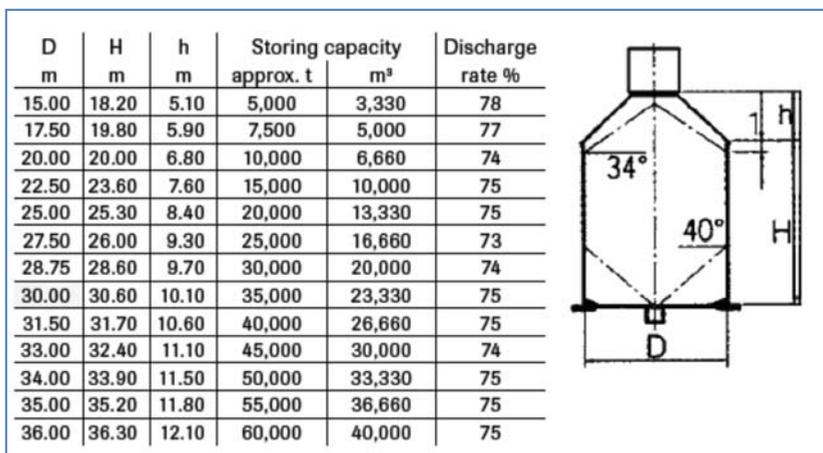


Figura 3.11. Esquema del almacenamiento de clínker en silos cilíndricos.

Un silo aislado comprende un cuerpo vertical con una sección constante, pero, en ocasiones, se unen varias celdas de sección transversal poligonal o circular: el conjunto constituye entonces una batería de silos. En tales casos, las células tienen, dos a dos, una pared o una generatriz común. Así por ejemplo, cuatro células circulares contiguas conformarán un conjunto habitualmente denominado "as de diamantes", empleado en ocasiones para el almacenamiento de materiales.

Después de varios años de utilización, debe efectuarse una descarga total del material acumulado en el fondo de los silos, puesto que las partículas de material tienden a consolidar y formar un cono empinado en el

suelo, por lo tanto, se recomienda dotar a todos los silos con puertas de entrada con cerradura. Asimismo, en la concepción de estas estructuras hay que considerar el gradiente térmico originado por la temperatura del producto ensilado, ya que el clínker llegará al silo a temperaturas cercanas a los 100 °C, y excepcionalmente, cuando aparecen problemas en el enfriador, deben esperarse temperaturas clínker extremadamente altas, superiores a 400 °C.



Fuente: Aumund

Figura 3.12. Dimensiones y capacidades de almacenamiento de clínker del silo cilíndrico.

En general, la capacidad de almacenamiento habitual de estos silos varía de 30.000 a 60.000 t, encontrándose mayores construcciones que alcanzan diámetros de más de 45 m y ofrecen unas capacidades de almacenamiento superiores a 80.000 t. A su vez, en función del diámetro del silo, la cubierta se diseña como una estructura de acero auto portante, revestida con paneles de cerramiento de forma trapezoidal o con una capa de hormigón armado.

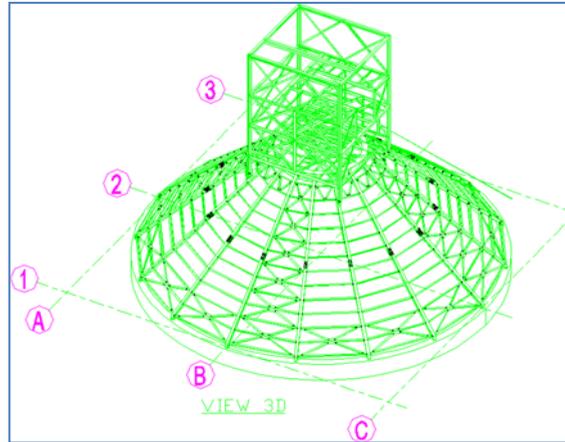


Figura 3.13. Modelo estructural de la cubierta de un silo cilíndrico.

Para el funcionamiento automático de silo, es de primordial importancia un sistema de control de nivel fiable. Una solución probada es la combinación de un sistema de piloto electro-mecánico para medir el nivel de material en el silo. Varias sondas cuerda supervisan el nivel de llenado máximo y varias sondas de varilla dispuestas en la zona de la tolva de carga activan el cierre de emergencia de las líneas transportadoras.

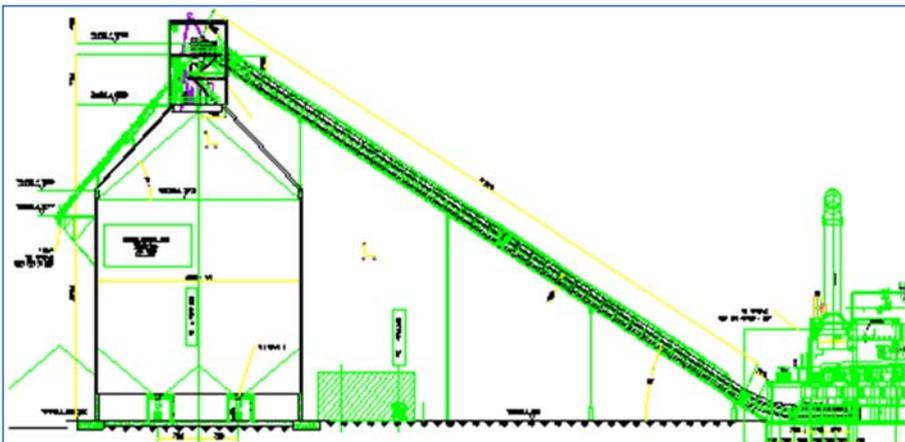


Figura 3.14. Sistemas de alimentación y descarga del silo cilíndrico.

La capacidad de almacenamiento viva del silo puede aumentarse introduciendo más de un túnel de descarga, en este caso el volumen de material que queda fuera de los conos de descarga se reduce y la mayor parte del clínker puede ser descargado por gravedad, tal como se muestra en la figura 3.14.

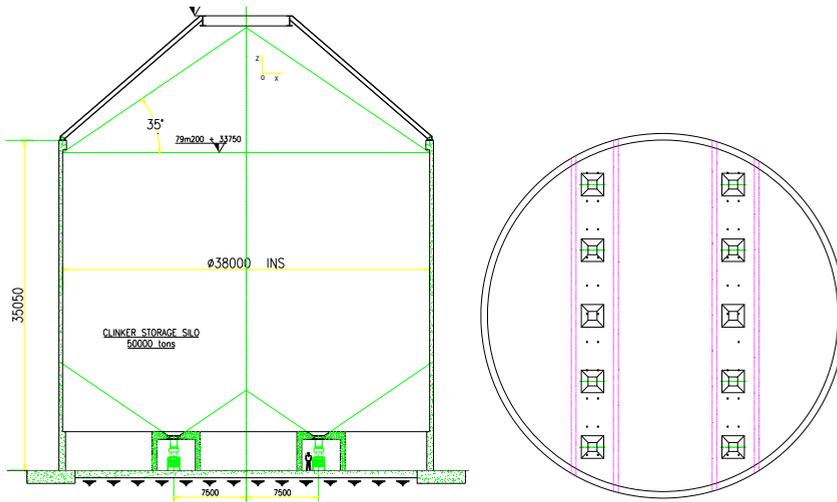


Figura 3.15. Silo cilíndrico con dos túneles de descarga por gravedad.

La cimentación de estos silos se resuelve de forma habitual mediante una zapata anular, o anillo de cimentación, sobre el que se apoya la falda del silo. Puesto que este sistema de almacenamiento la altura del material es superior a otros sistemas y parte del peso del mismo se transmite por rozamiento a las propias paredes del silo, que además deben resistir los empujes del material, las cargas transmitidas al suelo serán mayores que para otras tipologías de almacenamiento, como los depósitos circulares o longitudinales. Esto supone unos requerimientos de capacidad portante del suelo más exigentes y repercutirá en mayores costos de construcción en caso de peores terrenos.



Figura 3.16. Construcción de la cimentación de un silo cilíndrico para clínker.

En cuanto a la ejecución de la falda o fuste, la construcción mediante encofrados trepantes es común para estructuras altas como silos y las torres. El proceso implica un conjunto de encofrados que se mueven continuamente, o deslizan, hacia arriba a una velocidad de aproximadamente 30cm por hora por medio de varillas de apoyo y gatos hidráulicos. Como los encofrados van ascendiendo, las armaduras, las vainas de postesado y placas de carga se colocan de forma continua entre los encofrados conforme avanza el hormigonado y hasta que se completa la estructura. El post-tensado es el principal refuerzo circunferencial y proporciona la compresión residual en el hormigón en todas las condiciones de carga, lo que aumenta su durabilidad, a la vez que es un medio eficaz para mejorar la capacidad de corte del hormigón. Además, en el caso de una sobrecarga imprevista, esta armadura activa tiene la capacidad de cerrar las fisuras que pudieren producirse. La compresión residual proporcionada por el post-tensado. En el fuste del silo se construyen unos machones o contrafuertes continuos en toda la altura del silo, donde se colocarán las placas

del postensado de forma que quedan accesibles desde el exterior para operaciones de tesado e inyección.



Figura 3.17. Silo cilíndrico para clínker en construcción.

Finalmente se coloca la estructura de cubierta, habitualmente metálica, y el casetón superior que recibirá el transportador de alimentación del silo. El apoyo del techado sobre la coronación del silo de hormigón se realiza con apoyos deslizantes, de modo que las deformaciones térmicas, o la ovalización del silo por la asimetría del material almacenado, no induzca sobrecargas importantes a la estructura de cubierta. Para garantizar la estanquidad del recinto se dispone la capa de cerramiento que apoya sobre las vigas y correas de la estructura metálica.



Figura 3.18. Ejecución de la cubierta y casetón superior de un silo cilíndrico para clínker.

3.3. Almacén longitudinal

En el Almacén Longitudinal (LSG) es una evolución del depósito circular, donde el material vertido desde un punto superior formaba una pila cónica. En este caso el punto de alimentación de material se desplaza longitudinalmente, por lo que el material a granel se coloca en el suelo conformando pilas prismáticas alargadas. Tal como se indicó anteriormente, las restricciones concernientes a las emisiones ambientales (Elzea Kogel, Trivedi, & Krukowsk, 2006) obligan a realizar el almacenamiento de clínker en estructuras cerradas, así pues, es necesario prever techados y fachadas cerradas para cubrir el depósito.



Figura 3.19. Almacén longitudinal para clínker.

Cuando cualquier material se descarga desde una cierta altura con una caída libre se forma un cono, la sección transversal es un triángulo cuyos ángulos respecto a la base corresponden con el ángulo de rozamiento

interno del material, en el caso del propio clínker es del orden de 30 grados. Evidentemente, el área de la sección transversal y la anchura de la base de este triángulo variarán en función de la altura de vertido. La sección transversal triangular resultante también puede convertirse en trapezoidal o en una pila plana si empleamos apiladores rotativos o con la ayuda de buldóceres.

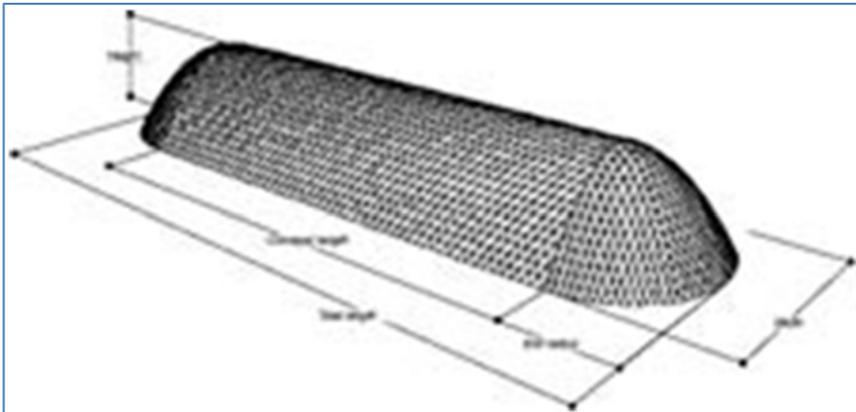


Figura 3.20. Pila de almacenamiento longitudinal.

La longitud de la pila es una variable que se decide por los requisitos de capacidad conforme a la sección transversal adoptada, el tipo de almacenamiento y la maquinaria de recuperación que se adoptará con sus limitaciones y el área disponible. En base a estas limitaciones, podrán disponerse varias pilas para alcanzar la capacidad total deseada.

El material se descarga por una banda móvil desde arriba, pudiéndose también emplear un apilador lateral. Para retirar el material, podemos utilizar túneles de extracción o un recuperador mecánico con raspadores. Este sistema de almacenamiento a menudo tiene mayores costes de inversión que otras soluciones. Al igual que en el depósito circular, la capacidad de acopio de los sistemas de almacenamiento de clínker longitudinal se puede aumentar considerablemente mediante la excavación un cono de

tierra. El cono inferior se proporciona generalmente con una inclinación de 40° a 45° . Además, de este modo el ratio de descarga se mejora considerablemente.



Figura 3.22. Vista interior de un almacén longitudinal.



Figura 3.21. Estructura de cerramiento del almacén longitudinal.

Para conformar un almacén cerrado se recurre a estructuras de tipo nave industrial, cuidando especialmente los remates y zonas de unión entre elementos para aumentar la estanquidad del recinto, de forma que se cumplan los requisitos ambientales y de protección de la salud de los trabajadores citados anteriormente para el caso del almacenamiento de clínker.

3.4. Silo domo

La cúpula es una tipología estructural empleada ya en la antigüedad, que con los silos tipo Domo ha adquirido una utilización moderna y económica. Además de su utilización para el almacenamiento de materiales, en la actualidad se utiliza proyectos arquitectónicos como polideportivos, estadios, edificios religiosos, auditorios, etc.



Figura 3.23. Silo domo para clínker.

Mediante la solución tipo Domo pueden realizarse de modo sencillo estructuras de simple o doble curvatura, especialmente apropiadas para resolver de grandes luces e importantes cargas horizontales. Además, al ser herméticas se convierten en una construcción adecuada para la implantación de grandes almacenes, en especial para materiales a granel. Asimismo, por su propia configuración son capaces de mantener estables las condiciones climáticas en su interior, por lo son frecuentemente empleados para el almacenamiento de productos alterables por cambios de temperatura

como pueden ser los cereales, el azúcar, el agua, el cemento, el carbón y otras materias primas. Del mismo modo, por las geometrías que pueden obtenerse y por su acabado exterior presentan un aspecto muy estético (Loczy, Gyenizse, Ronczyk, & Dezso, 2007).

El silo domo puede adoptar soluciones con diferentes geometrías de forma que permite resolver una extensa diversidad de problemas. Esta versatilidad, unida a pueden soportar cargas sobre toda la superficie de la estructura, posibilita un aprovechamiento óptimo del área disponible en planta y disminuir el volumen de la instalación con un ajuste máximo a la capacidad de almacenamiento deseada (Sambashivan, 2011). Así, su configuración permite el aprovechamiento del volumen interior y se posibilita su llenado total.

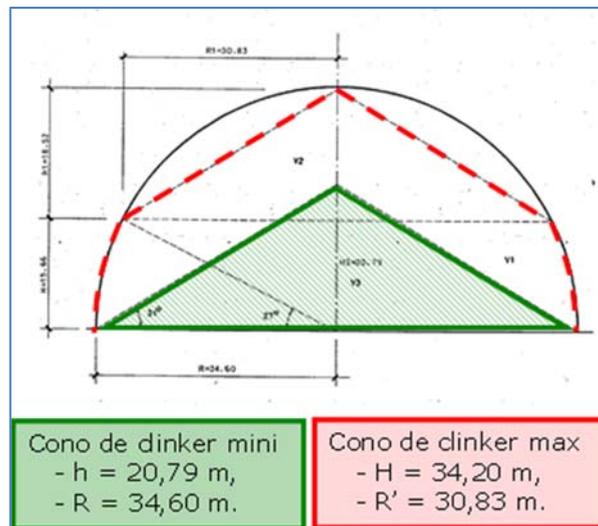


Figura 3.24. Aprovechamiento del volumen interior del silo domo.

Las estructuras Domo para el almacenamiento son láminas, tradicionalmente ejecutadas en hormigón armado, conformadas por superficies de simple o doble curvatura, lo que otorga a la bóveda un excelente comportamiento frente a cargas puntuales y distribuidas. Se trata de una construcción monolítica, sin diferenciación entre fuste y cubierta, por lo que presenta un buen comportamiento estructural. Esto mejora la respuesta ante los fenómenos sísmicos, atmosféricos y otras eventualidades naturales. Cabe citar que el estadio Superdome de Nueva Orleans fue una de las construcciones que mejor resistió las acciones del huracán Katrina. Al mismo tiempo, el desarrollo del método de los elementos finitos y el avance de los medios informáticos de cálculo ha favorecido, en las últimas décadas, el perfeccionamiento y optimización de este tipo de construcciones (Wan, 2014).

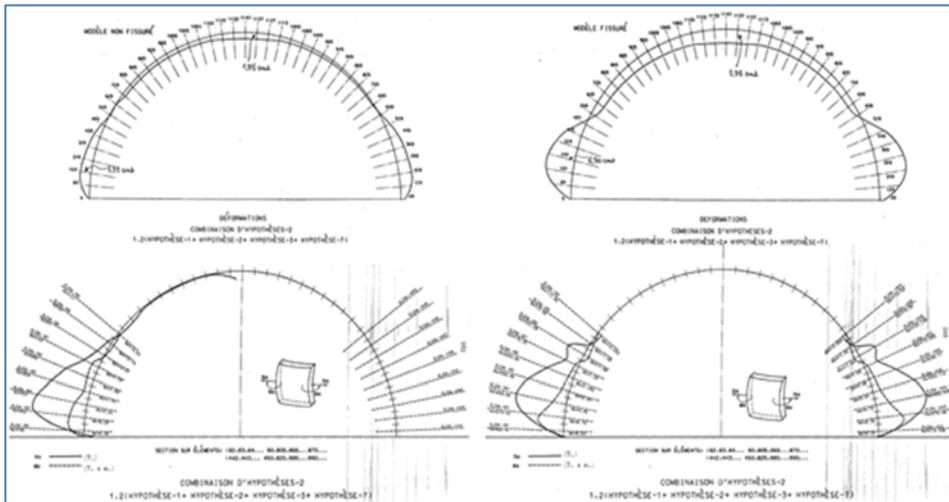


Figura 3.25. Modelización mediante elementos finitos.

Para la ejecución de silo domo de hormigón se emplea como dispositivo auxiliar una lámina presurizada de PVC, de elevada resistencia, que se pretensa y presuriza, de forma que quedará incorporada a la obra como acabado exterior (Niemeyer & Kuster, 1997).

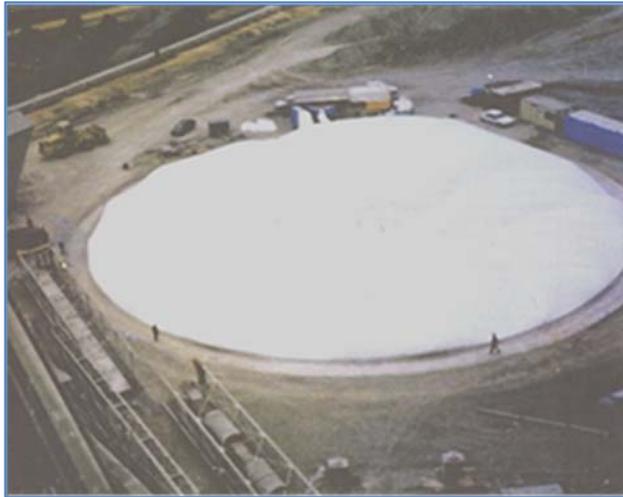


Figura 3.26. Ejecución del domo, fijación de la membrana de PVC.

Inicialmente se ejecuta la cimentación anular del silo, sobre la que quedará fijada la lámina de PVC, para proceder después a su presurización. Tras el inflado de la membrana, se proyecta en la cara interior una espuma de poliuretano. Así, el conjunto de la membrana exterior y la espuma de poliuretano garantizan la impermeabilización de la construcción. Asimismo se mejora el aislamiento térmico del depósito, reduciendo los posibles fenómenos de condensación, lo que permite el almacenamiento de otros productos como cemento, azúcar, cereales...

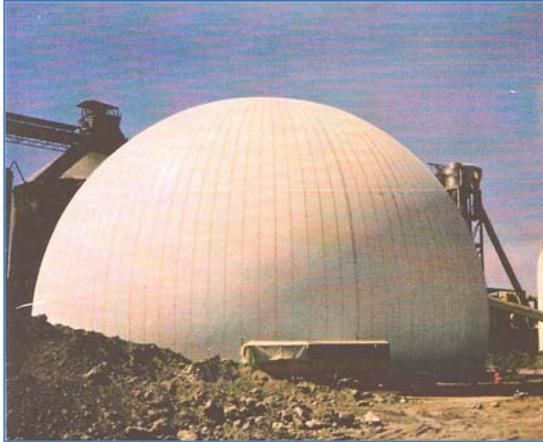


Figura 3.27. Ejecución del domo, fijación de la membrana de PVC.

A continuación se realiza el procedimiento de disposición de las armaduras de acero y de proyección de hormigón, hasta la total construcción de la estructura de hormigón armado. En este proceso constructivo es posible realizar la proyección del hormigón en varias capas del orden de 4 cm., consiguiendo así reducir las retracciones y la permeabilidad del silo domo.



Figura 3.28. Ejecución del domo, hormigonado.



Figura 3.29. Ejecución del domo, ferrallado interior.

La versatilidad geométrica del silo domo permite aumentar, en caso de ser necesario, el diámetro de apoyo de la estructura, con lo que puede disminuirse la altura y se reduce así el valor de carga por metro cuadrado sobre suelos de poca resistencia, además presenta una buena capacidad de adecuación a los asientos diferenciales. Esta característica convierte a Domo en una alternativa a considerar en zonas con terrenos de baja capacidad portante o con limitación de altura (Niemeyer & Kuster, 1997).

Existen asimismo otras tipologías y procedimientos constructivos para las estructuras domo, como la construcción de estructuras metálicas trianguladas que reproducen tridimensionalmente la forma deseada y sobre ella se disponen los paneles de cerramiento que completan la construcción. No obstante, en lo que al almacenamiento de clínker se refiere, se emplea fundamentalmente la lámina de hormigón arado descrita, por la

estanquidad que proporciona, capacidad de llenado y por la resistencia que presenta frente a los empujes del material.

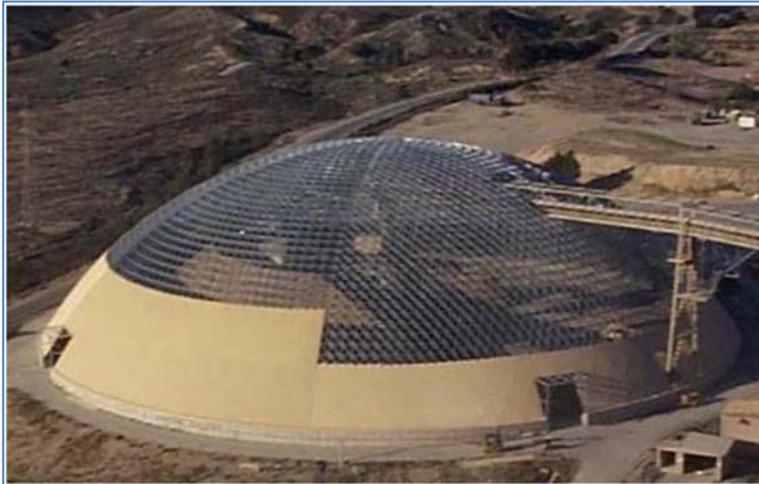


Figura 3.30. Domo para parque de homogeneización.

En cuanto a los sistemas de alimentación de clínker y extracción del material, la estructura de doble curvatura permite la instalación de sistemas de extracción automáticos operados desde el exterior. Los sistemas preferidos en actualidad constan de una alimentación centrada en el vértice superior de la estructura y de la extracción del material por gravedad mediante túneles provistos de bandas transportadoras (European Commission, 2013).

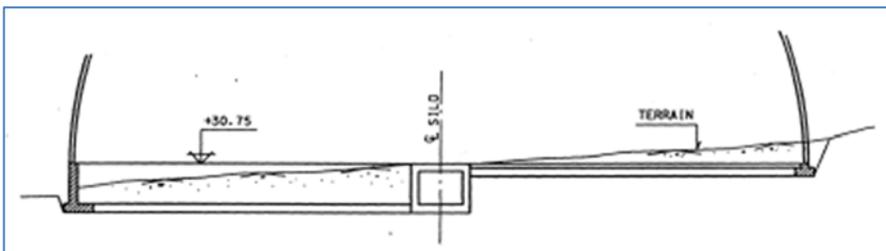


Figura 3.31. Túnel de extracción en Silo Domo.

Estos sistemas fueron analizados para las anteriores tipologías de silos consideradas, en función del número de túneles de extracción construidos aumentaremos el ratio de aprovechamiento del material almacenado, llegando a caudales de extracción de hasta 500 Tn/h.

Capítulo 4

Método de investigación

El método de investigación empleado en la presente tesis doctoral aúna tres técnicas desarrolladas para mejorar el proceso de toma de decisiones. Se trata pues, de una metodología híbrida que se sirve del método Delphi, del proceso analítico jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process) y de la técnica VIKOR,

El método Delphi es una técnica de previsión grupal que se sustenta en el juicio de un conjunto de expertos, se trata de un proceso iterativo y sistemático que pretende obtener los juicios y, si es posible, el consenso de un grupo de expertos (Gracht, 2012). Podemos afirmar que es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo (Hsu & Sandord, 2007). Mediante una serie de cuestionarios anónimos se recogen los juicios del grupo de expertos al que recurrimos para resolver el problema de toma de decisiones planteado. En la presente investigación nos valdremos de la técnica Delphi para realizar las

tres fases de cuestionarios que nos permitirán obtener los juicios del panel de expertos que servirán de partida para la aplicación del AHP-VIKOR posterior. En la fase inicial se determinará la estructura jerárquica del problema, analizando las alternativas y los criterios de selección. En la segunda fase de cuestionarios, mediante el Delphi, los especialistas realizarán las correspondientes comparaciones por pares de los criterios de decisión, para poder así determinar las prioridades relativas de estos criterios. El tercer nivel de cuestionarios servirá para realizar las comparaciones de las distintas alternativas consideradas para el almacenamiento de clínker en función de cada uno de los criterios.

El método AHP (Saaty, 1980), es un método efectivo para la resolución de problemas multicriterio de toma de decisiones, que ha sido aplicado para la gestión y la toma de decisiones en diversas áreas de la ingeniería y la construcción (Canto-Perello, Curiel-Esparza, & Calvo, 2013); (Martin-Utrillas, Juan-García, Canto-Perello, & Curiel-Esparza, 2014). El AHP es una teoría de la cuantificación relativa en escalas absolutas, capaz de abordar criterios intangibles, basada a la evaluación de juicios en comparaciones por pares realizadas por expertos con conocimientos en la materia (Lee & Chan, 2008); (Syamsuddin & Hwang, 2010). El principal cometido del aparato matemático del AHP es la cuantificación de los aspectos intangibles, tal como se muestra en el presente trabajo. Así pues, aplicamos el proceso analítico jerárquico para descomponer en partes más simples el complejo problema de elección de la alternativa más adecuada, pudiendo los expertos realizar las comparaciones por pares de estos ítems que conforman el problema global. Mediante el AHP asignaremos valores numéricos a los juicios del grupo de expertos, para así poder así obtener los vectores de preferencias y ordenar criterios y alternativas.

Por último, a técnica VIKOR permite hallar la solución de compromiso en problemas de toma de decisiones concernidos por factores no cuantificables y conflictivos entre sí (Martin-Utrillas, Reyes-Medina, J., & Canto-Perello, 2014). Las distintas alternativas son analizadas de acuerdo a los criterios de elección previamente establecidos y la solución de com-

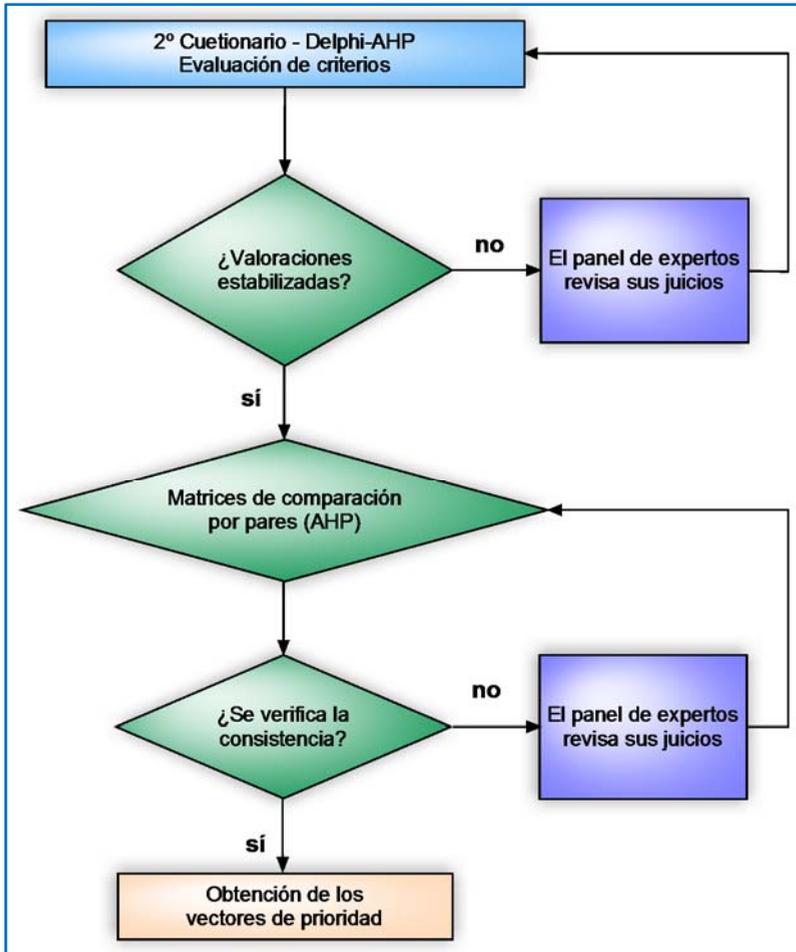


Figura 4.2. Método AHP, segundo cuestionario, evaluación de criterios.

Mediante el segundo y tercer cuestionario se evalúan los criterios y alternativas, siguiendo el método analítico jerárquico (AHP). Finalmente, a partir de los resultados del AHP, se aplica la técnica VIKOR para determinar la solución de compromiso.

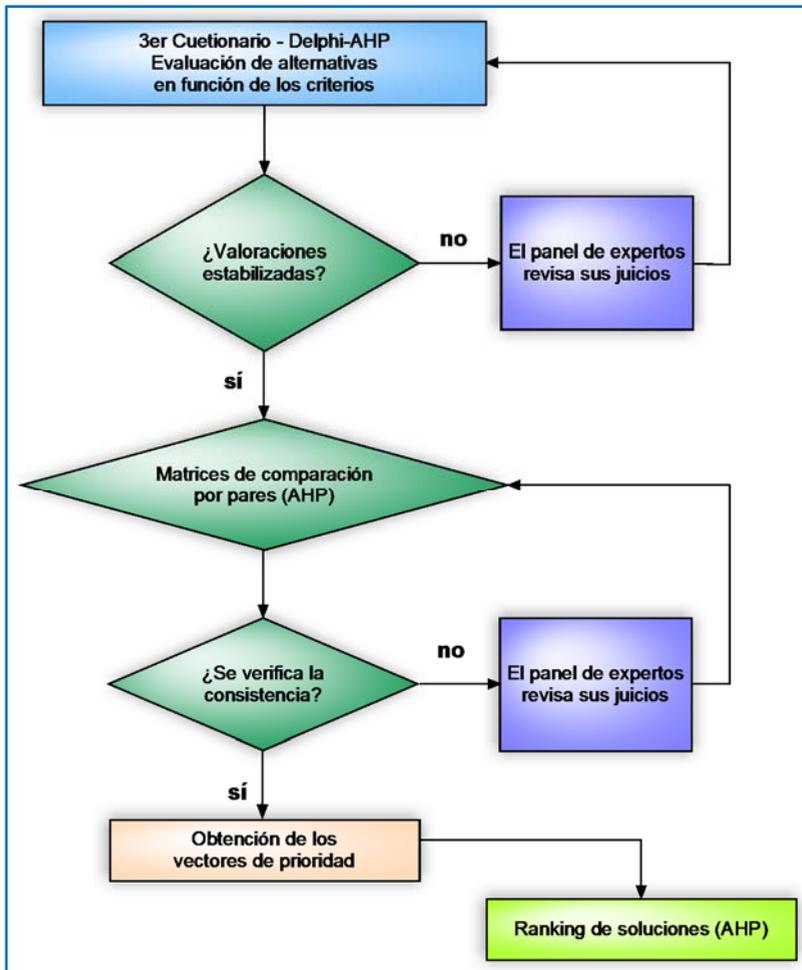


Figura 4.3. Método AHP, tercer cuestionario, evaluación de alternativas.

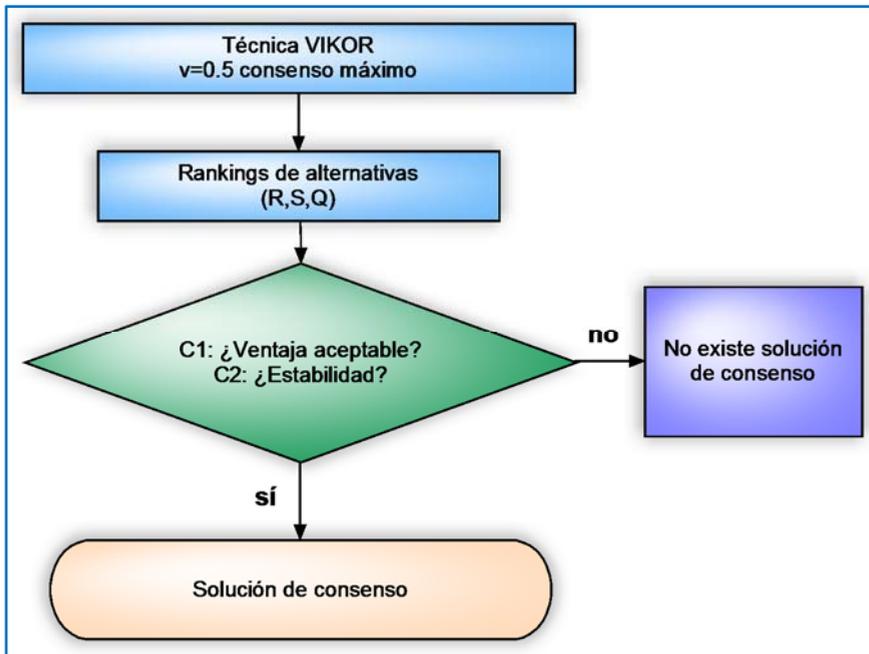


Figura 4.4. Técnica VIKOR, solución de compromiso.

4.1. El método Delphi

Cualquier previsión a futuro se fundamenta directa o indirectamente en el empleo de datos del pasado y la aplicación de técnicas o formulaciones que pretenden relacionarlos con el futuro. Se puede distinguir entre técnicas basadas en información objetiva (modelos probabilísticos, series temporales, métodos barométricos, modelos econométricos, etc.) y aquellas que emplean información subjetiva, que asimismo se subdividen en grupales o individuales.

Las técnicas de previsión objetiva presentan ciertas limitaciones, derivadas de la necesidad de datos históricos referidos a todas las variables implicadas así como de la difícil identificación y el conocimiento de todas

estas variables, que a su vez, se verán inexorablemente afectadas por la incierta mutabilidad del futuro (Godet, 1987).

En las técnicas subjetivas el individuo o grupo efectúa una filtración de la información por medio de sus experiencias, creencias y opiniones. Es decir, estos datos o información del pasado es “procesada” por la mente humana. Entonces, al recurrir al juicio subjetivo de uno o varios expertos, no se está desistiendo de la aplicación de una metodología científica, sino que, interpretando ésta de una forma menos tradicional, se establecen técnicas que permiten la utilización de esta información subjetiva de un modo explícito sistemático y razonado (Landeta, 2002). Asimismo, ha quedado demostrada la superioridad de las técnicas grupales sobre las individuales (Kaplan, Skogstad, & Girshick, 1950), puesto que emplean un mayor número de recursos, aumentan el rendimiento de los expertos y permiten tener en cuenta diversos elementos implicados en la cuestión a resolver.

4.1.1. *Reseña histórica*

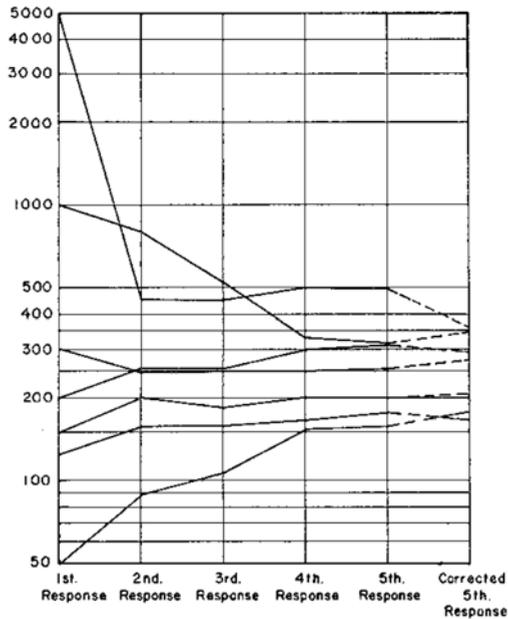
Algunos autores señalan como predecesor del método Delphi al método Vaticano (Ténière Buchot, 1972). En esta técnica para la toma de decisiones relativas a la religión católica, el colegio de cardenales debe alcanzar el consenso respecto a la decisión a adoptar. Para ello, tras el planteamiento y discusión pública de la cuestión, de modo anónimo e individual cumplimentan una hoja en la que indican su respuesta al problema planteado y los argumentos a favor y en contra. Tras reunirse de nuevo para conocer y debatir acerca de las respuestas y argumentos proporcionados, vuelven a retirarse para responder a un segundo cuestionario, similar al inicial. Así, se repite este proceso iterativamente de forma que las posturas se van acercando hasta la toma de la decisión por unanimidad.

4.1.1.1 Orígenes del método

El método Delphi, cuyo nombre viene inspirado por el antiguo Oráculo de Delfos (Kaplan, Skogstad, & Girshick, 1950), fue originariamente desarrollado en el *Rand Corporation*, un Centro de Investigación militar norteamericano, a finales de la década de los 40 y perfeccionado durante los años posteriores.

La primera investigación realizada con todas las características que define al método Delphi data de 1951, aunque por motivos de seguridad no fue publicada hasta años más tarde. Este estudio tenía como objeto realizar predicciones sobre un caso de catástrofe nuclear (Dalkey & Helmer, 1963). Concretamente los militares estadounidenses pretendían, desde el punto de vista soviético, predecir de una forma óptima el número de bombas atómicas necesario para reducir la capacidad de fabricar armamento por parte de los Estados Unidos hasta unos determinados niveles. Para ello se seleccionó un grupo de siete expertos a los que se remitió de forma individual y sucesiva una serie de cuestionarios, evitando la confrontación directa entre los distintos especialistas. Los cuestionarios versaban sobre la cuestión principal, así como sobre los factores cuya influencia se consideraba relevante y sobre los datos necesarios para alcanzar una conclusión, para obtener de este modo una respuesta más aquilatada de la cuestión inicial.

La información obtenida en los cuestionarios retroalimentaba los siguientes, si bien de una forma controlada. De este modo se trataba de conseguir el máximo consenso del grupo de expertos respecto a la cuestión planteada. Tal como cabía esperar, la cantidad de bombas nucleares estimada por cada uno de los expertos tendía a aproximarse. En la figura 1 se muestra como las opiniones de los expertos van confluyendo a medida que se desarrolla el experimento.



Fuente: Dalkey, N. & Helmer, O. (1963)

Figura 4.5. Sucesivas estimaciones del n° de bombas requerido.

A partir de la divulgación de esta investigación se acabó con el secretismo que rodeaba al método y se dio inicio a la expansión y desarrollo de esta técnica, cuya utilización se extendió a diversos campos científicos, sociales y tecnológicos

4.1.1.2 Desarrollo y evolución

Fuera del ámbito militar, una de las primeras aplicaciones del método Delphi de la que se tiene constancia fue llevada a cabo con fines sociales para la planificación de economías en desarrollo (Helmer & Quade, 1963). Un año más tarde (Gordon & Helmer, 1964), pertenecientes al *Rand Corporation*, realizan el primer empleo del método Delphi a gran escala, se

trata de un estudio de gran envergadura que se orienta hacia la previsión de tendencias a largo plazo tanto en temas sociales como tecnológicos y también militares.

Desde la desclasificación de los trabajos concernientes a la técnica Delphi por parte de las Fuerza Aéreas estadounidenses, el empleo del método ya no se ciñe tan sólo al *Rand Corporation*, extendiéndose su aplicación tanto temática como geográficamente. Los autores (Linstone & Turoff, 1975) realizan una minuciosa recopilación de los trabajos y publicaciones referidas a esta técnica, contabilizando un total de 489 trabajos hasta 1974, destacando los trabajos de *Institute for the Future* y las revistas *Futures* y *Tecnological Forecasting and Social Change*, además del citado *Rand Corporation*.

En el año 1974 se publica un trabajo de evaluación del método Delphi (Sackman, 1974), en el que desde el propio *Rand Corporation* se realiza una profunda crítica a la técnica Delphi, cuestionando los planteamientos en los que se basaba y su modo de utilización, ya que los consideraba contrarios a los paradigmas científicos clásicos que defendía la comunidad científica más tradicional, poniéndose en duda la congruencia de la investigación cualitativa. Diversos autores publicaron diferentes críticas y replicas, así como adhesiones a estas posturas, produciéndose un reexamen de los fundamentos de la técnica (Coates, 1975; Armstrong, 1978; Murray, 1979).

A partir de los años 80 el método Delphi entra en una etapa de continuidad (Landeta, 2002), donde la mayoría de trabajos no cuestionan el método sino que se centran en aplicar esta técnica a problemas concretos o a pulir determinados aspectos del método, como establecer el número óptimo de expertos, los efectos de las iteraciones, la precisión, etc.

4.1.2.Fundamentos del método

La técnica Delphi es un método de previsión grupal que se sustenta en el juicio de un conjunto de especialistas. Turrof y Linstone (1975) proponen la siguiente definición: *“Es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo”*.

Los creadores del método Delphi señalan que su objeto es *obtener el mayor consenso de opinión de un grupo de expertos* (Dalkey & Helmer, 1963). Esta técnica está caracterizada por unas premisas que lo distinguen de otros métodos grupales, a saber: el anonimato entre los participantes, la retroalimentación controlada y la respuesta estadística de grupo. Así pues, podemos decir que el Delphi es una técnica iterativa y sistemática que pretende obtener los juicios y, si es posible, el consenso de un grupo de expertos.

4.1.3.Características

Antes de identificar las características del método Delphi, señalar los postulados sobre los que se fundamenta esta técnica y conducen a los posteriores razonamientos que permiten configurar el método tal y como lo conocemos. Según (Dalkey N. C., 1967), uno de los padres del Delphi, estos postulados son:

- *La información relevante que acumula un grupo de expertos es igual o mayor que la de cualquier individuo del grupo.*
- *La información incorrecta que acumula un grupo de expertos es igual o mayor que la de cualquier individuo del grupo.*

- *La cantidad de modelos o procedimientos que posee el grupo para llegar a un resultado es como mínimo tan elevada como la que pudiera poseer cualquier miembro del grupo.*
- *Del mismo modo, la cantidad de modelos o procedimientos erróneos que posee el grupo para llegar a un resultado es como mínimo tan elevada como la que pudiera poseer cualquier miembro del grupo.*
- *La respuesta a una estimación numérica dada en forma de mediana es al menos tan buena como la mitad de las respuestas individuales de los expertos del grupo.*
- *Un miembro del grupo al que se le pide una evaluación numérica, aunque poco definida o de forma intuitiva, en su mente tendrá una distribución de probabilidad acerca de dicho valor, por lo que al dar una respuesta estará proporcionando en cierta forma la tendencia central de esa distribución. Así pues, teóricamente se podrá llegar a una evaluación más exacta a partir de la adición de las distribuciones de los individuos del grupo, tomando la media o la mediana de dicha distribución agregada considerada como respuesta del grupo.*
- *Proporcionando una retroalimentación controlada de la información y conservando el anonimato de los miembros del grupo de expertos, es posible reducir la mayor parte de los efectos psicológicos indeseados que se producen en las discusiones cara a cara, no renunciando por ello a sus principales ventajas.*

Asimismo, señalar una serie de premisas o antecedentes para una mejor comprensión del método y la orientación de los esfuerzos investigadores relacionados con el mismo (Landeta, 2002).

- *La mera inercia del pasado por si sola con configura el futuro, sino que éste es el fruto de complicadas interacciones entre numerosas fuerzas. No se entiende como algo único, inevitable e imprevisible, sino como una diversidad de futuros posibles a los que se asocian unas probabilidades de ocurrencia, que de algún modo pueden ser estimadas e incluso modificadas.*
- *El estudio de la información objetiva y su extrapolación al futuro muestra importantes limitaciones. Estas se derivan de la falta de fuentes de datos objetivos o de la no conveniencia de su utilización a la vista de la mutabilidad de las circunstancias del avenir.*
- *En el caso de la previsión a futuro, y en situaciones de incertidumbre, falta de información objetiva, etc., se hace necesario el recurso a la evaluación subjetiva de expertos.*
- *Las valoraciones subjetivas de especialistas están sujetas a inexactitudes y sesgos, lo que unido a la falta de conocimientos o información de un experto redundan en la precisión de sus evaluaciones.*
- *La eficacia del juicio del grupo es habitualmente superior al individual, tal como se puso de manifiesto anteriormente.*
- *En los procesos grupales cara a cara se dan fenómenos no deseados, como influencias negativas de los componentes dominantes o presiones para la adhesión.*

Una vez enunciados estos postulados y premisas que fundamentan el método Delphi podemos profundizar en los aspectos que lo caracterizan y definen. Estas características, enumeradas primeramente por (Dalkey & Helmer, 1963), son:

1. Se trata de un procedimiento iterativo, donde los miembros del grupo deberán emitir su juicio más de una vez. A medida que se efectúan las distintas rondas, las valoraciones de los expertos presentan habitualmente una tendencia a converger, concluyendo el proceso cuando estas evaluaciones se estabilizan. Este proceso hace posible que cada experto recapacite, e incluso modifique su postura, teniendo en cuenta la información recopilada en los sucesivos cuestionarios.
2. Se mantiene el anonimato entre los individuos del grupo, de este modo se pretende eliminar las consecuencias perjudiciales que los miembros dominantes ejercen sobre los demás, mitigando así algunos de los motivos que producen la inhibición de los expertos. Por ello, se recurre a cuestionarios escritos o procedimientos *online* para promover y facilitar la interacción necesaria en el proceso grupal sin renunciar al anonimato en las respuestas dadas. Igualmente, el proceso pretende evitar el inmovilismo de los expertos en las opiniones iniciales por motivos irracionales o psicológicos.
3. Retroalimentación (*feedback*) controlada. Como hemos dicho, la necesaria interacción entre participantes conduce a que el proceso grupal sea más eficaz que los procedimientos individuales. El método Delphi motiva esa interacción mediante el suministro de la información de cada ronda antes del inicio de la siguiente. La postura general del grupo se transmite a los miembros, así como los razonamientos o aportaciones significativas de algún experto. Del mismo modo son facilitadas las opiniones discordantes y cualquier tipo de información que el investigador considere relevante para la resolución del problema. El control de la información tiene por objeto reducir los *ruidos* o informaciones no relevantes para el estudio, bien por redundantes o por inco-

rectos. Asimismo, este control de la información permite unificar el lenguaje empleado por los diversos especialistas.

4. La respuesta estadística grupal que pretende que todas las opiniones queden recogidas por la respuesta final del grupo así como reducir la tendencia hacia la conformidad, puesto que, aunque se promueve el consenso no es el fin único y necesario del procedimiento. Cuando el problema planteado conlleva una valoración numérica, la respuesta grupal viene dada habitualmente por la mediana. El rango intercuartílico de los valores estimados será la medida del nivel de consenso conseguido (o de la dispersión de las contestaciones). Esta dispersión será también una importante información para el investigador.

4.1.4. Metodología

La aplicación de la técnica Delphi requiere, ciertamente, la existencia de un problema que pueda ser abordado por este método. El investigador o investigadores que abordan este problema deben ponerse en contacto con un grupo de personas (expertos conforme a la nomenclatura del método Delphi), estos individuos se consideran inicialmente apropiados para la evaluación del problema a la vista de sus conocimientos, experiencia o características y se les demanda su colaboración para participar en el estudio que se pretende realizar. Una vez conformado un adecuado grupo de expertos, los investigadores comenzaran a plantear cuestionarios a estos expertos.

Conforme al proceso habitual del método Delphi, el investigador debe transformar el problema objeto de estudio en preguntas o cuestiones aptas para ser abordadas por la técnica Delphi, esto es, que posibiliten rea-

lizar un tratamiento estadístico de las respuestas dadas por los expertos, con el fin de obtener una respuesta estadística de grupo. Esto sucede para el caso de estimaciones numéricas (cantidades, fechas, puntuaciones), de jerarquización de ítems o de probabilidades de ocurrencia. En alguno de estos casos, es posible proporcionar a los expertos una serie de ítems para que los jerarquicen, o bien plantear cuestiones abiertas de forma que sean los propios miembros del grupo los que faciliten los ítems sobre los que se desarrollará el posterior trabajo, tras el proceso de clasificación llevado a cabo por el investigador.

Así pues, una vez elaborados los cuestionarios, éstos son enviados o entregados a los expertos. Tras ser cumplimentados por los miembros del grupo, el coordinador lleva a cabo el tratamiento de las tendencias individuales, obteniendo una tendencia central de la distribución resultante, generalmente la mediana, que es aceptada como respuesta de grupo. Para aquellas cuestiones en las que resulta posible, se analiza también el rango intercuartílico de las respuestas, que sirve como medida de su dispersión. Entonces se envía a los expertos los resultados obtenidos, mediana y rango intercuartílico, junto a su respuesta anterior y cualquier tipo de información adicional que se considere de interés, bien sea solicitada o aportada por alguno de los expertos o bien porque el coordinador considere que esta información es de interés para el objetivo de la investigación. A partir de la información obtenida, se plantea a los expertos la opción de revisar sus estimaciones si así lo creen conveniente. No obstante, cuando sus respuestas se hallan fuera del rango intercuartílico, habitualmente se les requiere que expliquen su postura o las razones por las que creen que la mayoría de los expertos se encuentran equivocados. A su vez, estos razonamientos de los expertos discordantes son remitidos al resto del grupo para que pueda pronunciarse sobre el asunto.

El procedimiento anteriormente descrito se repite iterativamente hasta que se puede apreciar una estabilidad en los resultados, esto es, hasta que la mediana se mantiene prácticamente constante y el espacio intercuartílico deja de acortarse, lo que indica que se ha alcanzado el máximo

consenso posible. Y para concluir la metodología habitual del Delphi, se elabora el informe correspondiente y se remite a los expertos el resultado de la última ronda de cuestionarios, resultado que es adoptado como respuesta final de grupo.

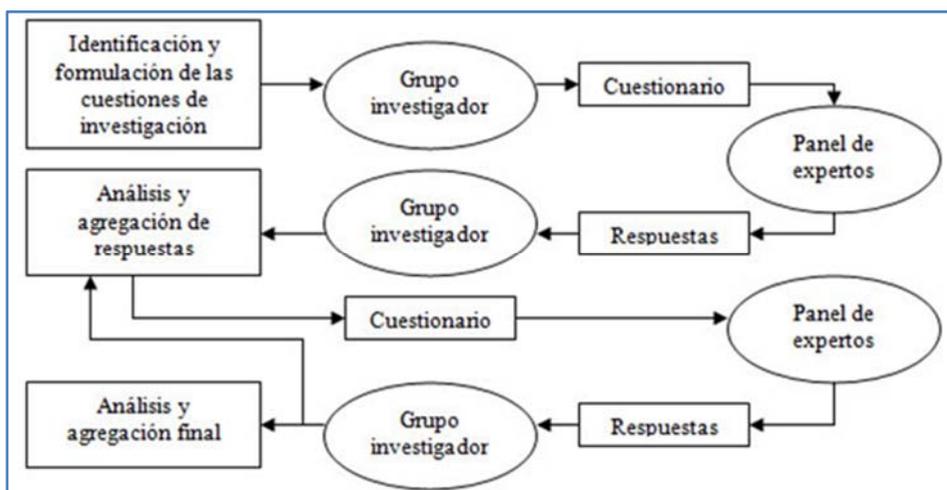
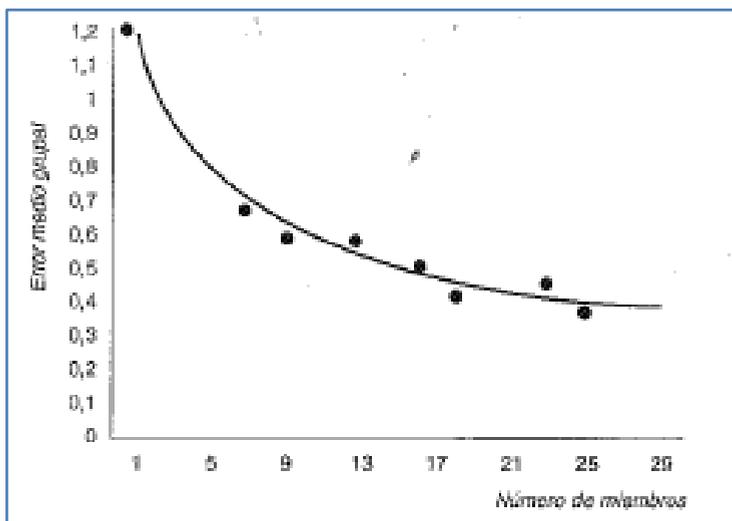


Figura 4.6. “Esquema del método Delphi”

4.1.4.1 Grupo de expertos

En los orígenes del método, el significado de experto era mucho más limitado del que hoy en día asumimos. Los creadores del método (Helmer & Rescher, *On the epistemology of inexact sciences*, 1959) consideraban que, un experto en el tema sobre el que versaba determinado estudio debía poseer un amplio conocimiento sobre la materia, así como un currículum con un elevado número de aciertos respecto a las hipótesis o predicciones formuladas durante un amplio periodo de tiempo, puesto que el que más saber acumula no es necesariamente el mejor predictor. Así pues, los dos criterios básicos para elección de los expertos eran los conocimientos en campo de estudio y la eficacia predictiva demostrada

Esta forma tan restringida de concebir al experto, aunque válida, resulta complicada de aplicar en la práctica. No hay que olvidar que el método Delphi se desarrolló originariamente como una herramienta únicamente previsional y con aplicación sobre campos muy concretos, como la investigación militar, para los que el tipo de experto empleado encajaba con el perfil descrito. En la actualidad la técnica Delphi se emplea en muy diversos campos de estudio, con distintas finalidades y sobre diferentes colectivos, por lo que el concepto de experto actual es mucho más amplio del considerado en los orígenes del método. Así pues, un experto puede ser definido como aquella persona que aporta una input relevante para la resolución del problema planteado (Pill, 1971). No obstante, a pesar de este concepto más abierto, desde los inicios del método se sigue conservando el término experto.



Fuente: Dalkey, N. (1969)

Figura 4.7. “Relación entre el nº de expertos y el error de previsión”

No existe un procedimiento para determinar con exactitud el número de expertos óptimo para la aplicación del método Delphi. Algunos autores han tratado de resolverlo mediante la aplicación del álgebra booleana (Galanc & Mikus, 1986), obteniendo resultados excesivamente simplistas.

Los propios científicos de la Rand Corporation, en los inicios del método se afanaron en establecer relaciones entre el tamaño del grupo de expertos y la precisión de la estimación grupal (Dalkey, Brown, & Cochran, 1970), concluyendo que el error de la previsión disminuye exponencialmente con el aumento del tamaño del grupo de expertos. A modo orientativo, indicaban que era recomendable un número mínimo de 7 expertos y que a partir de la treintena el error tendía a estabilizarse.

Hoy en día, y a la vista de los numerosos estudios realizados mediante la aplicación de la técnica Delphi, resulta evidente que el número de expertos ideal dependerá, en cada caso concreto, del campo de estudio concernido, del ámbito geográfico afectado y de los colectivos que estarán representados en dicho estudio. Asimismo, durante el propio desarrollo del estudio este número óptimo podrá ser reajustado en función de las situaciones concretas bajo las que se efectúan el trabajo, esto es, condiciones organizativas, plazos temporales o limitaciones de presupuesto entre otras. No obstante, existe un consenso a la hora de señalar que, salvo situaciones particulares, no es aconsejable grupos con número de expertos superior a 50, ya que el esfuerzo requerido no compensa con la posible reducción del error de previsión que acarrea.

A partir de la sección del grupo de expertos, y una vez garantizada su participación, un aspecto relevante del método radica en el peso que asignamos a las valoraciones de cada experto, es decir, si asumimos que todas ellas poseen el mismo valor o si resulta conveniente distinguirlas en función de su calidad. A priori parece recomendable la segunda de las opciones, sin embargo esto conlleva establecer los criterios que servirán para diferenciar a los distintos expertos y poder así ponderar sus estimaciones.

El criterio más adecuado será, evidentemente, la capacidad de predicción del experto, asentada en el nivel de conocimientos que ostenta. La dificultad radica en ser capaz de establecer a priori dicha capacidad, para resolver esta cuestión nos encontramos con varias alternativas que permitirán valorar la capacidad de predicción de los miembros del grupo.

1. Test de conocimientos, mediante cuestionarios previos es posible evaluar el nivel de conocimientos de los expertos.
2. A partir de indicadores indirectos de la capacidad de predicción y el grado de conocimientos, como por ejemplo las publicaciones relacionadas, citas, años de experiencia, aciertos en anteriores estudios, etc.
3. Recurrir a la valoración subjetiva de los expertos, ya sea por los coordinadores del estudio, o por un equipo externo o por los propios miembros del grupo.
4. Autoevaluación de cada experto, demandando a los expertos que califiquen sus conocimientos sobre cada uno de los temas tratados.

Esta última alternativa es la más empleada por su sencillez, presupone que los expertos son fiables en sus autoevaluaciones y que aquellos con mayores conocimientos realizan mejores predicciones. En este sentido, diversos autores han obtenido una mejor precisión con grupos de expertos con mayor autoevaluación respecto a otros grupos de expertos (Rowe & Wright, 1996) (Brown & Helmer, 1964), no obstante, otros autores no han hallado una relación significativa (Sackman, 1974) aunque sin llegar a demostrar que esto conduzca a peores resultados. Por ello, resulta conveniente en estudios con tipologías de expertos y de preguntas muy heterogéneas solicitar la autoevaluación de los expertos, con el fin de distinguir a los expertos de mayor cualificación y ponderar sus evaluaciones en el grupo, para mejorar así la precisión de la respuesta grupal.

4.1.4.2 Equipo investigador

El cometido del equipo investigador o grupo coordinador del estudio, constituido por el promotor del estudio, es llevar a cabo el procedimiento Delphi, interpretando adecuadamente las aportaciones de los miembros del panel de expertos. Por tanto, estos coordinadores deben conocer ampliamente el tema objeto de estudio, así como la técnica Delphi.

Las principales funciones del grupo coordinador son (Pashiardis, 1993):

- Elaborar el protocolo de trabajo: calendario propuesto, criterios de selección de los expertos, medios a emplear, diseño del informe final, etc.
- Analizar y aprobar el listado de expertos.
- Preparar los cuestionarios y favorecer la participación efectiva de los miembros del grupo.
- El análisis de las contestaciones y la elaboración de los siguientes cuestionarios, suministrando la información oportuna.
- La interpretación de los resultados.
- Controlar el correcto funcionamiento del estudio y, en caso de ser oportuno, adoptar las correspondientes medidas correctoras.

En definitiva, el coordinador o investigador no es un simple actor que realiza cuestiones y recopila las respuestas para dar una evaluación final, sino que en su adecuado trabajo residirá gran parte del éxito del estudio realizado mediante esta técnica. Es pues, una parte activa del proceso que conceptúa los miembros del estudio e influencia ineluctablemente la calidad y validez de las respuestas de los expertos, debiendo asimismo interpretarlas (Salancik, Wenger, & Helfer, 1971).

4.1.4.3 Cuestionarios

El paso principal del desarrollo del método es la obtención y transferencia de la información de un modo eficiente, de tal forma que se hace posible llegar a un resultado grupal final, diferenciado y de mayor valor que la simple agregación de opiniones individuales. Como se apuntó en el epígrafe anterior, el modo en que se plantean las cuestiones tendrá una inevitable en el resultado final, por lo que resulta importante elaborar estas pre-

guntas de una forma clara y concisa, evitando que la propia formulación de las cuestiones condicione la respuesta del experto.

Resulta recomendable iniciar el estudio con cuestionarios abiertos, como por ejemplo la identificación de un número determinado problemas, de alternativas, de soluciones, dificultades para llevarlas a cabo, comparación de ítems, etc. De tal forma que son los propios expertos los que proporcionarán los mimbres sobre los que se basará el resto del trabajo, al mismo tiempo que se reduce la influencia del grupo coordinador sobre la continuación del proceso y el resultado final.

Ahora bien, por la propia naturaleza del método Delphi, las preguntas específicas de esta técnica no pueden ser abiertas ya que esto no permitiría su posterior tratamiento estadístico. Es preciso que se presenten de un modo concreto que posibilite la integración numérica y objetiva de las contestaciones recibidas. Estas preguntas se engloban en dos grandes grupos: las valoraciones cuantitativas concretas y las jerarquizaciones, comparaciones o valuaciones de ítems (Spetzler & Von Holstein, 1975).

- *Valoraciones cuantitativas.*

Este tipo de preguntas son las más empleadas, podemos distinguir entre:

- a) Estimaciones puntuales: son valoraciones numéricas únicas sobre el objeto de la pregunta. Pueden ser absolutas, habitualmente a futuro, como precio, cantidad, fecha, etc. o probabilísticas, relacionando una probabilidad de ocurrencia a un suceso, valor o intervalo.
- b) Estimaciones no puntuales. Cuando un experto tiene que pronunciarse acerca de un suceso futuro incierto, se muestra frecuentemente reacio a dar una estimación concreta sobre éste. Resulta más conveniente y preciso si se le permi-

te dar su respuesta en forma de intervalos de confianza, de modo que el experto nos facilita unos valores máximos y mínimos con un nivel de confianza prefijado. Incluso, se le puede solicitar el valor que considera más probable dentro del intervalo que ha estimado.

- *Jerarquizaciones, comparaciones o valuaciones de ítems.*

A partir de una relación de ítems (problemas, criterios, alternativas, soluciones, etc.) facilitada por el coordinador del estudio o por los propios expertos mediante cuestionarios previos, se le pide al panel de expertos que efectúe alguna de estas acciones sobre los citados ítems:

- a) Jerarquización, es decir, ordenarlos asignando una posición a cada ítem conforme su cercanía al criterio referenciado
- b) Valuación, esto es, dar puntuaciones o votos conforme a una escala predefinida. Esta forma es preferible a la jerarquización cuando el número de ítems es importante, ya que resulta más sencillo para el experto. Asimismo, la propia valuación permite jerarquizar posteriormente los ítems en función del valor que se ha asignado a cada uno, y proporciona una mayor información del razonamiento del experto.
- c) Comparación: los ítems son comparados por pares según el criterio indicado. Resulta adecuado cuando se presupone que será complejo que los expertos jerarquicen o valoren un conjunto de ítems, resultando más sencillo comprarlos dos a dos, para posteriormente poder jerarquizarlos en función del resultado de las comparaciones.

4.1.4.4 Agregación de las respuestas

Las contestaciones individuales facilitadas por los expertos han de integrarse en una respuesta grupal, tanto si se trata de un cuestionario intermedio (retroalimentación de la información) como si se trata de la respuesta final del estudio como conclusión del procedimiento grupal desarrollado. El modo en el que se efectuará esta integración de evaluaciones individuales subjetivas vendrá condicionado por la forma en la que se han realizado las preguntas.

Tal como se señalado anteriormente, es habitual comenzar el proceso con preguntas abiertas que permitan obtener la base de la información para la continuación del método. Por su naturaleza, las respuestas a estos cuestionarios iniciales suelen ser poco estructuradas, no cuantificadas o incluso ambiguas. La integración de este tipo de cuestiones iniciales es cometido del grupo coordinador, ya que tiene que interpretarlas, resumirlas y adaptarlas a la técnica Delphi, intentando ser objetivos y conservando la información obtenida que se incorporará al procedimiento posterior. En cuanto a la agregación de las respuestas típicas del método Delphi, se procederá en función del tipo de cuestionario realizado, a saber:

- i. Estimaciones cuantitativas puntuales: Se obtiene la mediana de la distribución de valoraciones dadas por los expertos, como medida de su tendencia central. Asimismo se incluye alguna medida de su dispersión, habitualmente cuartiles, pudiendo también ser los percentiles, desviación típica o varianza).
- ii. Intervalos de confianza: Se realiza de la misma forma que el caso anterior, considerando que ahora son dos estimaciones por respuesta las que hay que integrar o incluso tres si los expertos también han facilitado el valor más probable esperado dentro del intervalo. El principal inconveniente en este caso radica en que el intervalo obtenido, a partir de la me-

diana de los extremos inferiores y superiores dados por el panel de expertos, no mantiene el nivel de confianza que poseían los intervalos individuales. Ante esto se plantean varias alternativas: la primera de ellas es presentar esta información como respuesta; la segunda consiste en demandar a los expertos que evalúen el nivel de confianza del intervalo obtenido y la tercera alternativa sería determinar el intervalo que contiene a todos los intervalos individuales y mediante la iteración del proceso podría ir ajustándose este resultado.

- iii. Jerarquización: Se calcula la tendencia central para las posiciones de cada ítem en las diversas respuestas, reordenándolos conforme al valor así obtenido. Esta nueva jerarquización será la respuesta del grupo.
- iv. Valoración: Obtenemos la mediana de las puntuaciones dadas a cada uno de los ítems y procedemos a reordenarlos según estos valores medios calculados.
- v. Comparación: para cada ítem y respuesta podemos establecer el número de veces que ha sido favorablemente comparado en comparación al resto de ítems, este valor servirá para realizar una jerarquización y su posterior integración en la respuesta grupal.

Además de lo anteriormente expuesto, tal como se indicó en los epígrafes precedentes, si a cada uno de los expertos del panel se le ha asignado un peso diferente en el grupo, las respuestas obtenidas serán afectadas por los coeficientes de ponderación correspondientes en función de la competencia presumida a cada experto.

4.1.4.5 Retroalimentación

La retroalimentación del proceso con la información que se va obteniendo en los cuestionarios es una de las características fundamentales del Delphi y los cambios de opinión de los miembros del grupo de expertos están claramente concernidos por dicho *feedback*, que a su vez sirve de medio de comunicación entre el panel de expertos y el grupo coordinador. Esta retroalimentación aporta las siguientes mejoras al proceso (Bowden, 1989):

- a) Aumento de la precisión de la respuesta grupal.
- b) Facilita un aumento de la convergencia de las valoraciones de los expertos del grupo.
- c) Permite anticipar las reacciones de los afectados frente a los resultados del estudio.

La información facilitada al panel de expertos puede tener diversas fuentes, puede provenir del grupo coordinador, de los propios expertos o de los valores cuantitativos obtenidos en cuestionarios previos, como la tendencia central y la desviación de las respuestas. Será función del coordinador el control de este *feedback*, teniendo en cuenta los fines del estudio a realizar, ya que si el objetivo del proceso no es llegar a un consenso máximo, sino conocer las posiciones y razones de un grupo de expertos, puede ser conveniente la omisión de alguna de estas informaciones durante el desarrollo de los cuestionarios.

4.1.4.6 Final del proceso

A la hora de abordar un estudio mediante el método Delphi, se hace necesario establecer criterios para dar por concluido el proceso. En los orígenes del método este criterio de finalización era el consenso, es decir, cuando las opiniones individuales presentan un alto grado de convergencia y por consiguiente el rango intercuartílico es pequeño. Esto puede prolon-

gar excesivamente el proceso u obviar los razonamientos y opiniones de la minoría, obligando en exceso a los expertos a la uniformidad. En la actualidad, aparejado a la ampliación de los campos de aplicación de técnica Delphi, se ha introducido el criterio de la estabilidad de las valoraciones de los expertos para dar por concluido el proceso. El criterio del consenso lleva implícita la estabilidad, sin embargo la estabilidad supone que, aunque no se llegue a la convergencia, las opiniones de los expertos ya permanecen prácticamente estables en sucesivas rondas de cuestionarios (Esade & Andersen, 1995). Existen diferentes formulaciones para medir dicha estabilidad, como por ejemplo la medida de los espacios intercuartílicos relativos, la relación entre la desviación típica y la tendencia central o criterios específicos establecidos para el estudio a realizar. Será pues labor del grupo coordinador del trabajo establecer los criterios para la finalización del estudio, pudiendo ser adaptados durante el desarrollo del mismo. Una vez finalizado el proceso se redactará el informe final de resultados, que se comunicará a las partes involucradas en la investigación.

4.2. El método AHP

El Proceso Analítico Jerárquico, conocido como AHP por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process,), planteado por Thomas L. Saaty, se fundamenta en la idea de que la complejidad que conlleva un problema de toma de decisiones con criterios múltiples, se puede solucionar por medio de la jerarquización de los problemas planteados (Saaty, 1977). Así pues, el AHP supone una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, agregando en el modelo criterios tanto tangibles como intangibles, así como la incertidumbre y la subjetividad inherente en el proceso de toma de decisión. El método ha contribuido a mejorar el proceso de decisión, tanto en niveles operativos como en tácticos y estratégicos, debido a la mejora en el conocimiento del problema y a la gran información que aporta.

El método fue inicialmente desarrollado durante los años setenta para la resolución del acuerdo de reducción de armamento estratégico entre la Unión Soviética y los EEUU. La experiencia, adquirida a lo largo de los años con la metodología AHP en varias esferas de toma de decisiones, demuestra que es una técnica apropiada para estructurar y abordar el consenso en problemas multicriterio complejos (Saaty, 1980). El método ha sido empleado para multitud de problemas de toda índole, como por ejemplo, la selección de profesores universitarios, la predicción de probabilidades de innovaciones técnicas, seleccionar el emplazamiento de plantas industriales en el exterior, o para evaluar la popularidad de artistas musicales. Hoy en día se aplica en los procesos de toma de decisiones en escenarios en los que interactúan factores tangibles e intangibles.

El AHP es una técnica que posibilita una toma de decisiones eficaz cuando nos enfrentamos a problemas complejos, que se fundamenta en nuestros procesos naturales a la hora de decidir. El método, para abordar una situación no estructurada y compleja, descompone el problema en sus partes (criterios, alternativas, factores...) de modo que estos componentes

del problema o variables puedan ser jerarquizados, es decir, son ordenados a partir de los valores numéricos asignados a juicios subjetivos en la comparación entre estas partes del problema. Así se hace posible discernir qué factores tienen mayor importancia, para que, actuando sobre estos, sea factible intervenir en el resultado del escenario. El AHP permite también estructurar el proceso grupal de toma de decisiones, puesto que insta una disciplina para el funcionamiento del grupo, y requiere que cada integrante del mismo asigne razonadamente un valor numérico a cada factor que interviene en el problema. Este modo de proceder precisa que los miembros del grupo sean consistentes en sus valoraciones y conclusiones, lo que implica juicios con una mayor congruencia, de forma que se incrementa la confianza en el AHP como técnica para la toma de decisiones.

4.2.1. Características

Así pues, el AHP es un método de análisis multicriterio que posibilita la toma de decisiones en problemas complejos, en los que actúan factores o criterios tangibles e intangibles en la elección de soluciones o alternativas.

Inicialmente se debe establecer el objetivo a alcanzar o problema a resolver, el AHP descompone el problema global en una jerarquía de niveles, ver figura 4.4, de modo que cada uno de ellos pueda ser estudiado de manera independiente. Se hace necesario conservar la homogeneidad de los ítems que pertenecen a cada uno de estos niveles, puesto que los expertos encargados de la toma de decisiones han de ser capaces de evaluar estos elementos realizando comparaciones entre pares, para cada uno de los niveles establecidos. La comparación entre pares puede hacerse mediante datos concretos de los criterios y alternativas considerados o a partir de los razonamientos subjetivos de los especialistas que participan en el AHP (Saaty, 2013).

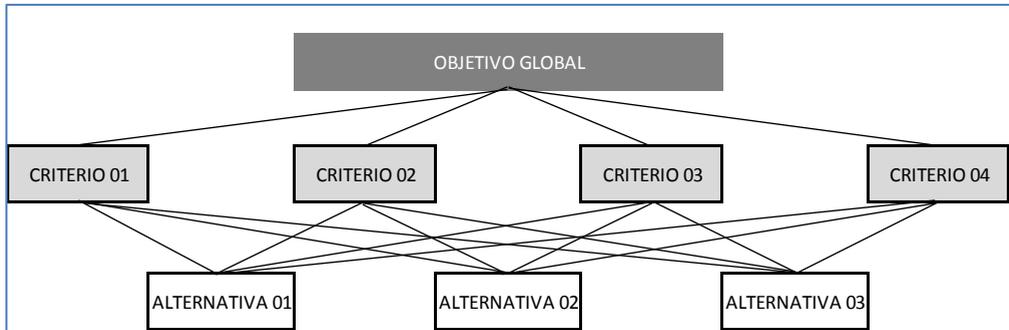


Figura 4.8. Esquema de estructura jerárquica del AHP

A la hora de abordar la comparación entre pares de ítems podemos recurrir a distintas metodologías. Habitualmente, con el fin de discriminar la intensidad de las relaciones entre los elementos, se emplea la escala de importancia relativa propuesta por Saaty (Saaty, 2008), incluida en la Tabla 4.1. Según el autor, esta escala posibilita al experto incorporar el conocimiento experiencia y la subjetividad de un modo intuitivo y natural. Así, para establecer la importancia relativa de un elemento cuando es comprado con otro elemento de su nivel jerárquico, se atribuyen valores numéricos comprendidos del 1 al 9.

Esta capacidad del AHP para transformar los juicios o datos empíricos en valores numéricos diferencia al método analítico jerárquico de otras técnicas de comparación de variables. De este modo, el método permite que las comparaciones entre elementos sean convertidas en valores numéricos de forma que pueden ser comparados, incluso aunque estas comparaciones atañen a aspectos intangibles.

Tabla 4.1. Escala fundamental de Saaty para la comparación por pares.

Intensidad de la Importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Importancia Moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve favorecida con mucha fuerza sobre la otra. Su dominio se demuestra en la práctica
9	Extrema importancia	La evidencia a favor de una actividad sobre otra es de mayor orden posible
2,4,6,8	Para interpolar entre los valores anteriores	A veces es necesario interponer numéricamente un juicio de transacción, puesto que no hay una palabra apropiada para describirlo
Recíprocos de los anteriores	Si a la actividad i se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad j , entonces j tiene el valor recíproco cuando se la compara con i	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad

Fuente: (Saaty, 2012)

Otros autores proponen alternativas a la escala de Saaty, a modo de ejemplo en la tabla 4.2 se incluyen valores intermedios que pueden considerarse en el proceso de toma de decisiones (Vargas, 1990).

Tabla 4.2. Escala para la comparación por pares.

Escala	Calificación numérica	Recíproco
Muy recomendado	9	1/9
De muy fuerte a extremadamente	8	1/8
Muy fuertemente preferido	7	1/7
De fuertemente a muy fuertemente	6	1/6
Fuertemente preferido	5	1/5
De moderadamente a fuertemente	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
De igualmente a moderadamente	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fuente: (Vargas, 1990)

La experiencia en la aplicación de esta escala de nueve unidades ha confirmado que es razonable. El emplear los valores impares de la escala permite que la diferencia entre dos opciones planteadas sea apreciable, mientras que los valores intermedios se reservan para alcanzar a un punto de consenso o una solución de compromiso entre dos posturas muy próximas (Saaty, 1980). Los factores intangibles se convierten así en valores numéricos, sin embargo estos juicios deberán ser evaluados mediante un test de consistencia para confirmar su validez, puesto que se trata de una aproximación subjetiva de la realidad.

Para representar las comparaciones por pares la matriz es la forma preferida. Para construir la matriz de comparaciones por pares, utilizamos

números para representar la importancia relativa de un factor o alternativa frente a otro conforme a la escala seleccionada. Los valores de la diagonal de la matriz serán 1, puesto que corresponden a la comparación de un ítem consigo mismo. El resto de posiciones de la matriz se completan con los resultados de la comparación por parejas realizada.

4.2.2. Base matemática

Una vez realizada la comparación, se coloca el valor obtenido de la escala empleada en la posición correspondiente de la matriz del nivel jerárquico analizado. Así, si el evaluador decide que el factor C1 tiene una moderada Importancia sobre el C2, situaremos un 3 en la casilla correspondiente al elemento A_{12} , y el recíproco en la casilla correspondiente al elemento A_{21} , puesto que para ser consistentes, el resultado de comparar X con Y debe ser el recíproco de comparar Y con X.

	C1	C2	...	Cn
C1	1	3		
C2	1/3	1		
...			1	
Cn				1

Figura 4.9. Construcción de la matriz de comparación por pares.

Así pues, únicamente es necesario realizar las comparaciones de los ítems situados por encima de la diagonal. Obtenidos éstos, la matriz puede completarse asignando automáticamente los recíprocos en el resto de elementos. En la figura siguiente se incluye la forma que adoptará la matriz de comparación por pares del AHP.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & \dots & 1 & \dots & a_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \dots & 1/a_{in} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 4.10. Forma de la matriz de comparación por pares.

Una vez que se obtiene la matriz (A) de comparación por pares de los factores, sintetizamos los juicios para obtener una estimación aproximada de las prioridades relativas de estos criterios. Según Saaty (1980), el vector propio principal de A es el vector ω de prioridades relativas. Para encontrar este vector, el sistema lineal $A\omega = \lambda\omega$ debe ser resuelto, los valores de dicho vector propio principal λ nos señalarán el peso de cada una de las opciones consideradas en el objetivo final.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (4.1)$$

En un caso ideal, partiendo de la matriz de comparación, podemos hallar las prioridades relativas normalizando la matriz. Calculando la media por filas para cada una de los ítems, se obtiene la prioridad de cada uno de estos respecto a la característica analizada. Cuando los juicios emitidos son consistentes, de la normalización de la matriz de comparación obtendremos valores similares por columnas, estos es, las preferencias entre opciones se mantienen en la totalidad de juicios de los expertos encuestados. Sin embargo, en la realidad el cerebro humano no posee una total exactitud a la hora de tomar decisiones. La subjetividad atañe a la propia naturaleza del ser humano, para poder asegurar la objetividad hemos de recurrir a la comparación de datos numéricos conforme a reglas concretas. Esto conlleva que las matrices de comparación obtenidas a partir de los juicios de los expertos conllevarán un determinado grado de inconsistencia en sí mismas, por lo que se ha de hallar el vector propio principal de la matriz de partida.

En consecuencia, en los problemas de toma de decisiones se hace necesario identificar cuan buena es la consistencia de los juicios emitidos, puesto que la decisión no puede basarse en juicios con una consistencia tal que parezcan emitidos al azar. De hecho, la consistencia perfecta es difícil de alcanzar, sin embargo, a hora de establecer prioridades es necesario exigir un cierto nivel de consistencia para garantizar la validez de los resultados obtenidos. El propio método AHP mide el grado de inconsistencia surgida en el proceso de evaluación, con el fin de garantizar el procedimiento, ya que, como hemos apuntado, los especialistas no son habitualmente capaces de expresar preferencias consistentes cuando numerosos criterios son evaluados la vez, implicando factores tangibles e intangibles.

El método AHP evalúa la coherencia global de las evaluaciones mediante la obtención de un ratio de consistencia (CR). En la práctica, el valor de del ratio de consistencia ha de ser del 10 por ciento o inferior ($CR \leq 0.1$), para un orden (n) de la matriz igual o mayor que cinco, mientras que para $n=4$ ($CR \leq 0.09$) y para $n=3$ ($CR \leq 0.05$). Si la inconsistencia supera estos valores, las respuestas de los expertos pueden ser ligeramente aleatorias y los juicios deben ser revisados. Este ratio de consistencia CR se obtiene dividiendo el índice de consistencia (CI) por el índice de consistencia aleatorio (RCI) calculado por Saaty y recogido en la tabla 4.3.

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (4.2)$$

Para calcular el (CI), se necesita el valor propio mayor (λ_{max}) de la matriz de comparación por pares (A). Entonces, el índice de consistencia (CI) se obtiene de la siguiente forma:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.3)$$

Tabla 4.3. Índice de consistencia aleatorio (RCI).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fuente: (Saaty, 2012)

Si el CR es calculado supera los valores límites indicados, significa que los juicios no son consistentes. En tal caso, para alcanzar la consistencia, los juicios habrán de ser revisados y perfeccionados.

4.2.3. Procedimiento de aplicación

Como resumen de lo anteriormente expuesto, se recoge en el presente epígrafe el esquema de pasos a seguir para aplicación del método del proceso analítico jerárquico. Una vez establecido y definido el problema a resolver u objetivo a alcanzar, el método proporcionará un orden a los factores que componen el problema, organizándolos conforme a una jerarquía. Una vez jerarquizados, podremos efectuar la comparación por parejas entre los ítems pertenecientes a un mismo nivel, según lo requiera el elemento del nivel superior siguiente. A partir de las matrices obtenidas de la comparación por pares se determinarán las prioridades por pares resultantes que, mediante síntesis, darán lugar a las prioridades globales. Finalmente, para contrastar la validez de los resultados obtenidos, se calcula la consistencia y se analiza la interdependencia, para dar validez al proceso o dar lugar a una revisión de los juicios emitidos.

Este esquema de pasos puede resumirse en los siguientes puntos (Al-Harbi, 2001):

I. Enunciación del problema, determinando específicamente el objetivo final del proceso.

II. Obtención de la jerarquía que estructura el problema de forma global, partiendo de los niveles superiores, hasta el nivel en el que es factible intervenir para solucionar el problema.

III. Se establece la estructura de las matrices de comparaciones por parejas de la contribución pertinente o el impacto que cada elemento ejerce sobre cada criterio prevalente en el nivel inmediato superior.

IV. Se realizan las encuestas para obtener los juicios de los expertos que permitan completar las matrices planteadas en el punto anterior.

V. A partir de los vectores propios se podrán obtener las prioridades relativas de cada ítem y se comprobará el ratio de consistencia de los resultados obtenidos, validándolos o dando lugar a una revisión y repetición del proceso. Esto se realizará para cada uno de los niveles y universos de la jerarquía.

VI. Obtención del vector global de prioridades mediante la síntesis de las prioridades relativas, conforme a la estructura jerárquica previamente establecida y en función de los pesos asignados a los diferentes criterios

Evidentemente, la complejidad de los cálculos a realizar aumentará conforme se complique el objetivo planteado y su estructura jerárquica. El método AHP proporciona un proceso estable en términos generales, pudiendo profundizar en el alguno de estos pasos cuando un problema específico así lo requiera, siendo frecuentemente necesaria la repetición para garantizar la consistencia.

4.3. Técnica VIKOR

Los métodos de optimización multicriterio establecen procedimientos para determinar la mejor solución posible conforme a unos criterios establecidos. En la realidad, los problemas de toma de decisiones se ven habitualmente afectados por criterios no conmensurables y conflictivos, lo que puede conducir a la inexistencia de la solución ideal que consiga satisfacer la totalidad de criterios a la vez, Esto conduce a la necesidad de determinar una “solución de compromiso”. Este concepto de solución de compromiso en los métodos de decisión multicriterio se introdujo en los años setenta (Yu, 1973) y (Zeleny & Cochrane, 1973).

El método VIKOR es un método de decisión multicriterio, en serbio *Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*, cuya traducción es *Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso*. Esta técnica fue desarrollada por Serafim Opricovic (Duckstein & Opricovic, 1980), ideada para la resolución de problemas de toma de decisiones con criterios en conflicto y no conmensurables, asumiendo que el compromiso es aceptable para la resolución de conflictos. La aplicación práctica del método fue introducida en 1998 (Opricovic, 1998), mientras que posteriores investigaciones han contribuido a su aceptación internacional (Opricovic & Tzeng, 2004), (Opricovic S., 2011). Para la toma de decisiones buscaremos la solución que más se aproxime a la ideal, evaluando las alternativas de acuerdo a todos los criterios establecidos. El VIKOR clasifica las diferentes alternativas y determina la solución llamada “de compromiso” como la más cercana al ideal.

La técnica VIKOR emplea una función sumatorio que representa la cercanía a la solución ideal. Las diferentes alternativas son clasificadas de modo que la mayoría del grupo obtenga su máxima utilidad y menor rechazo individual para el resto, asumiendo que las soluciones han sido evaluadas en función de cada criterio, el ranking de compromiso se puede llevar a cabo mediante la comparación de la medida de la cercanía a la solución ideal (Sayadi, Heydari, & Shahanaghi, 2009).

La aplicación del método VIKOR se inicia con la siguiente forma de métrica-Lp. Los datos de entrada son los elementos f_{ij} de la matriz del rendimiento (decisión), donde f_{ij} es el valor de la función de criterio i -ésimo para la alternativa j .

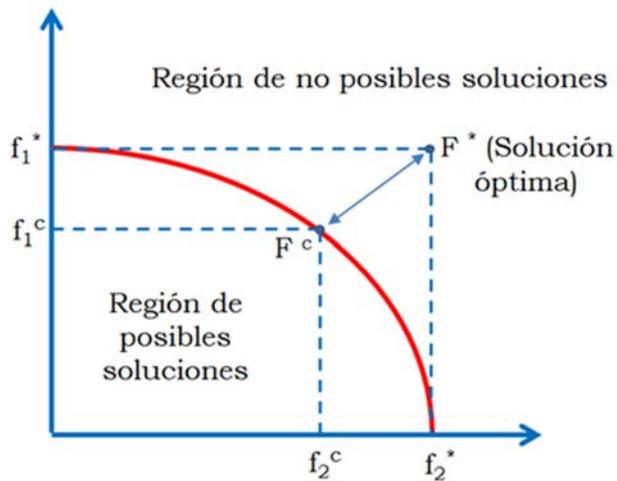
$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (4.4)$$

Siendo

$$1 \leq p \leq \infty;$$

$i = 1, 2, \dots, m$ (número de criterios)

$j = 1, 2, \dots, n$ (número de alternativas)



Fuente: Martín-Utrillas, M. et al. (2015)

Figura 4.11. Cercanía a la solución ideal.

Para evaluar la cercanía a la solución ideal, la técnica VIKOR emplea dos métricas, que corresponden a los valores de $p = 1$ y $p = \infty$, con lo que se obtienen dos listas, S_i y R_i respectivamente (Opricovic S. , 1998). La métrica L_1 , también denominada distancia Manhattan o distancia Taxicab, es aquella en la cual la distancia entre dos puntos es la suma de las diferencias absolutas de sus coordenadas. La métrica L_∞ corresponde con la distancia de Chebyshev, cuyo nombre se debe al matemático ruso Pafnuti Chebyshev, es una métrica definida en un espacio vectorial donde la distancia entre dos puntos, representados por sus vectores, es la mayor de sus diferencias a lo largo de cualquiera de sus dimensiones coordenadas. La solución con un menor valor de S_i es la que presenta el máximo consenso, mientras que el mínimo rechazo por parte del oponente se corresponde con la solución con el mínimo valor de R_i . El VIKOR contempla la introducción de un parámetro ν para controlar el equilibrio entre las dos métricas, según sea la estrategia que quiera seguirse, con lo que se obtiene una tercera lista Q_i que es la que proporciona la solución de compromiso.

Para la aplicación del método VIKOR se comienza calculando el mayor f_j^* y el menor valor f_j^- de todas las calificaciones para cada criterio y se obtienen los valores de S_i , R_i y Q_i mediante las siguientes expresiones:

$$f_j^* = \max_i \{f_{ij}\} \quad (4.5)$$

$$f_j^- = \min_i \{f_{ij}\} \quad (4.6)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (4.7)$$

$$R_i = \max_j w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (4.8)$$

$$Q_i = \nu \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \nu) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (4.9)$$

Donde:

$$S^* = \min_i S_i$$

$$R^* = \min_i R_i$$

$$S^- = \max_i S_i$$

$$R^- = \max_i R_i$$

Mientras que w_j son los pesos asignados a los criterios, para representar la importancia relativa de los criterios conforme a las valoraciones de los expertos y ν es el peso para la estrategia de máxima utilidad del grupo, o máximo consenso, y $(1 - \nu)$ es el peso para el menor rechazo individual. Se adoptan los valores por consenso ($\nu \sim 0.5$), o "con veto" ($\nu < 0.5$) o "mayor utilidad del grupo" ($\nu > 0.5$).

Seguidamente se ordenan las alternativas, conforme a los valores de S, R y Q, en orden ascendente. Se propone la alternativa con el mejor el valor de Q (mínimo) como una solución de compromiso, siempre que se verifiquen las dos condiciones siguientes:

- Condición 1 - *Ventaja aceptable*: la diferencia entre la alternativa $A_{(1)}$ mejor clasificada por su valor de Q y la siguiente $A_{(2)}$, es mayor que DQ , siendo $DQ = 1/(J-1)$ y J el número de alternativas.
- Condición 2 - *Estabilidad aceptable en la toma de decisiones*: La alternativa debe ser también la mejor calificada en las listas conforme a S y/o R.

En la toma de decisiones podría validarse la solución así obtenida, denominada solución de compromiso, puesto que presenta una mayor aceptación de la mayoría (representada por S_{\min}), y un rechazo mínimo individual del oponente o del resto del grupo (representado por R_{\min}). Ambas medidas S y R han sido integradas en Q para la búsqueda de dicha solución de compromiso.

Si una de las condiciones no se cumple, entonces se plantea un conjunto de soluciones de compromiso, que consiste en:

- Si únicamente la condición $C2$ no se cumple, las alternativa $A_{(1)}$ y $A_{(2)}$ mejor clasificadas en la lista Q se proponen como soluciones de compromiso válidas.
- Si únicamente la condición $C1$ no se cumple, se proponen como soluciones de compromiso las alternativas $A_{(1)}, A_{(2)}, \dots, A_{(M)}$; siendo $A_{(M)}$ determinada por la expresión $Q(A_{(M)}) - Q(A_{(1)}) < DQ$ para el máximo valor M . Se dice entonces que las alternativas están en cercanía (*in closeness*).

Capítulo 5

Aplicación de la metodología propuesta

5.1. Definición del objetivo

En el presente capítulo, mediante un sistema experto, analizaremos el caso de un almacenamiento de clínker para una capacidad de 50.000 toneladas que se ubica en el área mediterránea española, formando parte de una fábrica de producción de cemento.

El almacén de clínker se sitúa en una zona costera ubicada a unos 5km del núcleo urbano más próximo. La parcela de la fábrica tiene suficiente espacio para albergar en nuevo depósito y el terreno sobre el que se construirá el silo está formado por unas gravas arcillosas que presentan una capacidad portante de unos 0.2 MPa.

El responsable de proyecto ha de establecer la estructura de almacenamiento más adecuada de entre los siguientes sistemas, el Silo Cilíndrico Round (Clinker Silo - RCS), el Almacén Longitudinal con descarga por gravedad (Longitudinal Store with Gravity Discharge - LSG), el depósito Circular (Circular Store with Gravity Discharge - CSG) y el Silo Domo (Clin-

ker Storage Dome - CSD), la figura 5.1 muestra esquemas de estas estructuras. De acuerdo con el Joint Research Center (European Commission, 2013), estos cuatro sistemas son las mejores técnicas aplicadas hoy en día para para el almacenamiento de clínker en la industria cementera, para el rango de capacidades empleado.

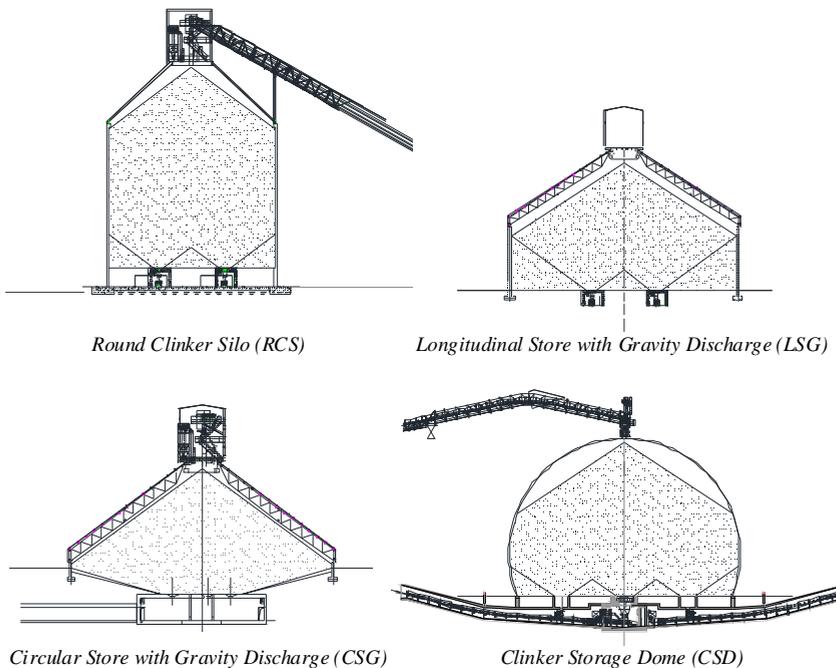


Figura 5.1. Alternativas para el almacenamiento de clínker.

Para la aplicación del método híbrido Delphi-APH, se ha formado un grupo de 10 expertos en esta material para la toma de decisiones. Estos especialistas han trabajado o estudiado problemas relacionados con la industria cementera o con las estructuras de almacenamiento de materiales. 3 miembros de este grupo trabajan en departamentos relacionados con la

ingeniería y la construcción en diversas universidades europeas, otros 3 miembros pertenecen a empresas constructoras que han llevado a cabo construcciones similares a las estudiadas y 4 miembros son ingenieros consultores que han elaborado proyectos de este tipo por todo el mundo.

5.2. Jerarquización del problema

En la fase inicial del Delphi-AHP, se analizan alternativas y establecen los criterios para la decisión, mediante el debate con los expertos. Para ello, un cuestionario anónimo es remitido al panel de expertos en dos fases, de modo que los resultados obtenidos inicialmente son ajustados en la segunda fase.

La elección del tipo de silo no sólo depende de criterios conmensurables, como el coste de la construcción, sino también de factores intangibles y difícilmente cuantificables. En este problema de toma de decisiones, el director del proyecto en general, tiene que identificar factores de decisión importantes y evaluar su importancia relativa con el fin de establecer la instalación más adecuada. La jerarquía básica de este problema de toma de decisiones se elaboró sobre la base de los criterios indicados en la literatura y en las sugerencias de los expertos mediante el método Delphi. Cada experto fue consultado para identificar posibles factores a tener en cuenta en el proceso de decisión, llegando al árbol de jerarquías final que se muestra en la figura 5.2.

La selección de la tipología óptima silo consta de criterios de elección fundamentales, tales como:

- Costes de construcción, es decir, los costes la ejecución de la estructura y los equipos mecánicos necesarios para su funcionamiento (Teichler, 2010), (García Fernández, Pizarro García, Gutiérrez Lavín, Bueno de las Heras, & Juan Pis, 2013)

- Los costes de operación, incluyendo los costos relacionados con la operación y mantenimiento durante la vida útil de la instalación en sí (Alsop, 2014); (Groenewald, Vosloo, & Mathews, 2012).
- Operatividad de material, es decir, la eficiencia en la carga y descarga de la instalación de almacenamiento y su capacidad para garantizar la calidad del producto almacenado (Wilson, 2013); (Li, Yu, & Yuan, 2012).
- Las características del suelo, las propiedades del suelo y su capacidad de soporte definirá la tipología de almacenamiento más adecuado para cada lugar (Auxilia, 2009); (Aguirre, 2010); (Mistikova & Jendzelovsky, 2012).
- Duración del proyecto, que tiene en cuenta el tiempo necesario para la construcción y la puesta en marcha (Dembla & Mersmann, 2007).
- Durabilidad de la instalación, la capacidad del sistema de almacenamiento para resistir los daños causados por la agresividad del material almacenado, la temperatura, la fricción, etc. va a determinar su vida útil (Lippold, 2012); (Kok & Hui, 2010).
- Seguridad frente al riesgo de daño causado por un fallo estructural, contra fenómenos inesperados tales desastres naturales o accidentes operacionales (Radandt, 2012); (Fabbrocino, Iervolino, & Manfredi, 2002).
- Sostenibilidad ambiental, este criterio considera la contribución del tipo seleccionado de sistema de almacenamiento con la sostenibilidad ambiental y su efecto sobre la planta en su conjunto (Harder, 2012); (Mikulcic, Vujanovic, & Duic, 2013); (Hasanbeigi, Lobscheid, Lu, Price, & Dai, 2013).

- Impacto visual, evaluar el efecto visual de la instalación de almacenamiento en el entorno específico considerado (Loczy, Gyenizse, Ronczyk, & Dezso, 2007).

Puede observarse que finalmente se ha planteado una jerarquía donde todos los criterios se sitúan en un único nivel, debido a las posibles interrelaciones entre ellos y a la dificultad de agruparlos en grupos de criterios independientes, ya que en caso de tratarlos como subcriterios, algunos de ellos podrían pertenecer a varios criterios de primer nivel.

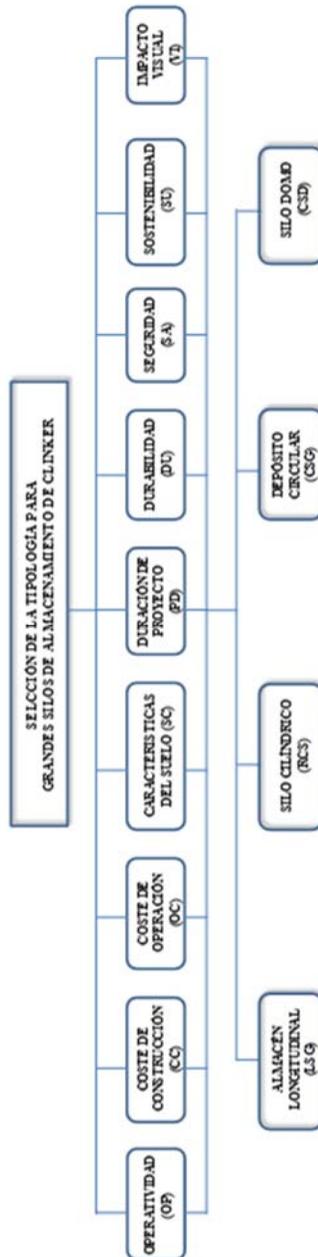


Figura 5.2. Jerarquía para determinar el sistema de almacenamiento de clínker más adecuado en el caso estudiado.

5.3. Valoración de criterios

De acuerdo con el método Delphi, encuestamos al grupo de expertos para evaluar la importancia de los criterios de decisión. El paso clave en el establecimiento de las prioridades de los elementos en un problema de decisión es hacer comparaciones por pares, es decir, realizar la comparación de los elementos dos a dos para un criterio dado. El proceso Delphi logra la interacción entre el panel de expertos con respuestas anónimas, mientras AHP se aplica para dividir el proceso de decisión global en componentes más pequeños de juicio (Curiel-Esparza & Canto-Perello, 2012).

Cada experto realizó una comparación por pares para indicar su preferencia por cada criterio, para las respuestas se emplea la notación clásica de Saaty proveniente de la utilización de su escala fundamental de 9 puntos en inglés, que fue abordada en el capítulo anterior, la tabla 5.1 recoge dicha notación.

Tabla 5.1. Notación de la escala fundamental de Saaty para la comparación por pares.

Notación	Significado	Grado de importancia
EP	A factor or facility is extremely more preferred to another	9
VP	A factor or facility is very strongly more preferred to another	7
MP	A factor or facility is moderately more preferred to another	5
SP	A factor or facility is slightly more preferred to another	3
QP	A factor or facility is equally preferred to another	1
SN	A factor or facility is slightly more non-preferred to another	1/3
MN	A factor or facility is moderately more non-preferred to another	1/5
VN	A factor or facility is very strongly more non-preferred to another	1/7
EN	A factor or facility is extremely more non-preferred to another	1/9

La Tabla 5.2 muestra el cuestionario particular enviado a los expertos para evaluar cada criterio principal con respecto al sistema de almacenamiento de clínker.

Tabla 5.2. Cuestionario para evaluar los criterios

Con respecto al objetivo global "Selección del sistema de almacenamiento de clínker más adecuado":

Q1	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Coste de Construcción (CC)
Q2	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Coste de Operación (OC)
Q3	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Características Suelo (SC)
Q4	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Plazo Ejecución (PD)
Q5	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Durabilidad (DU)
Q6	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Seguridad (SA)
Q7	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
Q8	Cuán importante es Operatividad (OP) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
Q9	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Coste de Operación (OC)
Q10	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Características Suelo (SC)
Q11	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Plazo Ejecución (PD)
Q12	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Durabilidad (DU)
Q13	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Seguridad (SA)
Q14	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
Q15	Cuán importante es Coste de Construcción (CC) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)

- Q16 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Características Suelo (SC)
- Q17 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Plazo Ejecución (PD)
- Q18 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Durabilidad (DU)
- Q19 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Seguridad (SA)
- Q20 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
- Q21 Cuán importante es Coste de Operación (OC) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
- Q22 Cuán importante es Características Suelo (SC) cuando es comparado con Plazo Ejecución (PD)
- Q23 Cuán importante es Características Suelo (SC) cuando es comparado con Durabilidad (DU)
- Q24 Cuán importante es Características Suelo (SC) cuando es comparado con Seguridad (SA)
- Q25 Cuán importante es Características Suelo (SC) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
- Q26 Cuán importante es Características Suelo (SC) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
- Q27 Cuán importante es Plazo Ejecución (PD) cuando es comparado con Durabilidad (DU)
- Q28 Cuán importante es Plazo Ejecución (PD) cuando es comparado con Seguridad (SA)
- Q29 Cuán importante es Plazo Ejecución (PD) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
- Q30 Cuán importante es Plazo Ejecución (PD) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
- Q31 Cuán importante es Durabilidad (DU) cuando es comparado con Seguridad (SA)
- Q32 Cuán importante es Durabilidad (DU) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)
- Q33 Cuán importante es Durabilidad (DU) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
- Q34 Cuán importante es Seguridad (SA) cuando es comparado con Sostenibilidad Ambiental (SU)

Q35	Cuán importante es Seguridad (SA) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)
Q36	Cuán importante es Sostenibilidad Ambiental (SU) cuando es comparado con Impacto Visual (VI)

Las respuestas de evaluación se pueden encontrar en la Tabla 5.3. Como resultado, se construye la matriz de comparación por pares para los criterios, por agregación de los juicios individuales (AIJ) del panel de expertos, utilizando el valor de la media geométrica obtenida de la Tabla 5.3, aplicando a cada respuesta los valores de la escala descrita.

$$A(f) = (a_{ij}(f)) n \times n, \text{ donde } a_{ij} = \prod_{k=1}^m (a_{ij}^{(k)})^{1/k} \quad (5.1)$$

La agregación de los juicios individuales, denominado método AIJ, es el procedimiento de agregación habitual en los problemas de selección de alternativas mediante el AHP. Para la agregación de estos juicios individuales emitidos por los expertos, se emplea la técnica de la media geométrica ponderada (Canto-Perello & Curiel-Esparza, 2013), para poder llegar de este modo a una matriz de juicio colectivo. Así pues, esta agregación permitirá tratar al panel de expertos como a un nuevo individuo, por ello el AIJ ha de cumplir la de la condición de reciprocidad para los juicios. La media geométrica ponderada mantiene la forma recíprocamente simétrica de las matrices de juicio y satisface el Principio de Pareto para los juicios y la llamada condición de homogeneidad, cosa que otros procedimientos no aseguran (Forman & Peniwati, 1998).

Tabla 5.3. Resultados de la evaluación de criterios respecto al objetivo global.

Comparación por pares	Resultados para cada experto									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Q1 Operatividad (OP) vs. Coste construcción (CC)	SN	SN	SP	SN	SP	SN	SP	MN	SP	SN
Q2 Operatividad (OP) vs. Coste operación (OC)	SN	QP	SN	QP	QP	QP	SP	QP	QP	QP
Q3 Operatividad (OP) vs. Características suelo (SC)	MS	QP	QP	SN	QP	SN	SP	QP	QP	SN
Q4 Operatividad (OP) vs. Duración proyecto (PD)	MP	MP	VP	MP	VP	QP	MP	SP	MP	MP
Q5 Operatividad (OP) vs. Durabilidad (DU)	QP	SP	SP	QP	SP	SP	QP	QP	SP	QP
Q6 Operatividad (OP) vs. Seguridad (SA)	SP	SP	QP	SP	SP	QP	SP	SN	QP	SP
Q7 Operatividad (OP) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	QP	QP	MP	QP	SP	SN	SP	SN	SP	QP
Q8 Operatividad (OP) vs. Impacto Visual (VI)	SP	MP	MP	SP	VP	SN	SP	QP	MP	QP
Q9 Coste construcción (CC) vs. Coste operación (OC)	QP	SP	SN	SP	SN	SP	SP	MP	SN	SP
Q10 Coste construcción (CC) vs. Características suelo (SC)	MN	SP	MS	QP	SN	QP	SP	MP	SN	QP
Q11 Coste construcción (CC) vs. Duración proyecto (PD)	VP	VP	MP	MP	MP	SP	SP	VP	MP	MP
Q12 Coste construcción (CC) vs. Durabilidad (DU)	SP	MP	QP	SP	QP	MP	SN	MP	QP	SP
Q13 Coste construcción (CC) vs. Seguridad (SA)	MP	MP	SN	MP	QP	SP	AP	SP	SN	MP
Q14 Coste construcción (CC) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	SP	SP	SP	SP	QP	QP	QP	SP	QP	SP
Q15 Coste construcción (CC) vs. Impacto Visual (VI)	MP	VP	SP	MP	MP	QP	QP	MP	SP	SP
Q16 Coste operación (OC) vs. Características suelo (SC)	SN	QP	SN	SN	QP	SN	QP	QP	QP	SN

Q17	Coste operación (OC) vs. Duración proyecto (PD)	VP	MP	VP	SP	VP	QP	SP	SP	MP	SP
Q18	Coste operación (OC) vs. Durabilidad (DU)	SP	SP	SP	QP	MP	SP	SN	QP	SP	QP
Q19	Coste operación (OC) vs. Seguridad (SA)	MP	SP	QP	SP	MP	QP	QP	SN	QP	SP
Q20	Coste operación (OC) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	SP	QP	MP	QP	MP	SN	QP	SN	SP	QP
Q21	Coste operación (OC) vs. Impacto Visual (VI)	MP	MP	MP	SP	VP	SN	QP	QP	MP	QP
Q22	Características suelo (SC) vs. Duración proyecto (PD)	EP	MP	EP	MP	MP	SP	SP	SP	MP	MP
Q23	Características suelo (SC) vs. Durabilidad (DU)	MP	SP	MP	SP	SP	MP	SN	QP	SP	SP
Q24	Características suelo (SC) vs. Seguridad (SA)	VP	SP	SP	MP	MP	SP	QP	SN	QP	MP
Q25	Características suelo (SC) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	MP	QP	VP	SP	SP	QP	QP	SN	SP	SP
Q26	Características suelo (SC) vs. Impacto Visual (VI)	VP	MP	VP	MP	MP	QP	QP	QP	MP	SP
Q27	Duración proyecto (PD) vs. Durabilidad (DU)	MN	SN	MN	SN	MN	SP	MN	SN	SN	SN
Q28	Duración proyecto (PD) vs. Seguridad (SA)	SN	SN	VN	QP	MN	QP	SN	MN	MN	QP
Q29	Duración proyecto (PD) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	MN	MN	SN	SN	MN	SN	SN	MN	MN	SN
Q30	Duración proyecto (PD) vs. Impacto Visual (VI)	SN	QP	SN	QP	QP	SN	SN	SN	SN	SN
Q31	Durabilidad (DU) vs. Seguridad (SA)	SP	QP	SN	SP	QP	SN	SP	SN	SN	SP
Q32	Durabilidad (DU) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	QP	SN	SP	QP	QP	MN	SP	SN	SP	QP
Q33	Durabilidad (DU) vs. Impacto Visual (VI)	SP	SP	SP	SP	MP	MN	SP	QP	SP	QP
Q34	Seguridad (SA) vs. Sostenibilidad ambiental (SU)	SN	SN	MP	SN	QP	SN	QP	QP	SP	SN
Q35	Seguridad (SA) vs. Impacto Visual (VI)	QP	SP	MP	QP	MP	SN	QP	SP	MP	SN
Q36	Sostenibilidad ambiental (SU) vs. Impacto Visual (VI)	SP	MP	MP	QP	MP	SP	MP	SP	VP	MP

A partir de las respuestas de los expertos podemos construir las matrices de comparación de criterios para cada experto, ordenadas del primer experto al décimo, que se presentan a continuación:

(5.2) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 1:

1	1/3	1/3	1/5	5	1	3	1	3
3	1	1	1/3	7	3	5	3	5
3	1	1	1/3	7	3	5	3	5
5	3	3	1	9	5	7	5	7
1/5	1/7	1/7	1/9	1	1/5	1/3	1/5	1/3
1	1/3	1/3	1/5	5	1	3	1	3
1/3	1/5	1/5	1/7	3	1/3	1	1/3	1
1	1/3	1/3	1/5	5	1	3	1	3
1/3	1/5	1/5	1/7	3	1/3	1	1/3	1

(5.3) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 2:

1	1/3	1	1	5	3	3	1	5
3	1	3	3	7	5	5	3	7
1	1/3	1	1	5	3	3	1	5
1	1/3	1	1	5	3	3	1	5
1/5	1/7	1/5	1/5	1	1/3	1/3	1/5	1
1/3	1/5	1/3	1/3	3	1	1	1/3	3
1/3	1/5	1/3	1/3	3	1	1	1/3	3
1	1/3	1	1	5	3	3	1	5
1/5	1/7	1/5	1/5	1	1/3	1/3	1/5	1

(5.4) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 3:

1	3	1	1/3	7	3	1	5	5
1/3	1	1/3	1/5	5	1	1/3	3	3
1	3	1	1/3	7	3	1	5	5
3	5	3	1	9	5	3	7	7
1/7	1/5	1/7	1/9	1	1/5	1/7	1/3	1/3
1/3	1	1/3	1/5	5	1	1/3	3	3
1	3	1	1/3	7	3	1	5	5
1/5	1/3	1/5	1/7	3	1/3	1/5	1	5
1/5	1/3	1/5	1/7	3	1/3	1/5	1/5	1

(5.5) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 4:

1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	3
3	1	3	1	5	3	5	3	5
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	3
3	1	3	1	5	3	5	3	5
1/3	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	3
1/3	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	3
1/3	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1

(5.6) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 5:

1	3	1	1	7	3	3	3	7
1/3	1	1/3	1/3	5	1	1	1	5
1	3	1	1	7	5	5	5	7
1	3	1	1	5	3	5	3	5
1/7	1/5	1/7	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1
1/3	1	1/5	1/3	5	1	1	1	5
1/3	1	1/5	1/5	5	1	1	1	5
1/3	1	1/5	1/3	5	1	1	1	5
1/7	1/5	1/7	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1

(5.7) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 6:

1	1/3	1	1/3	1	3	1	1/3	1/3
3	1	3	1	3	5	3	1	1
1	1/3	1	1/3	1	3	1	1/3	1/3
3	1	3	1	3	5	3	1	1
1	1/3	1	1/3	1	3	1	1/3	1/3
1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/5
1	1/3	1	1/3	1	3	1	1/3	1/3
3	1	3	1	3	5	3	1	3
3	1	3	1	3	5	3	1/3	1

(5.8) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 7:

1	3	3	3	5	1	3	3	3
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1	1
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1	1
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1	1
1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/3
1	3	3	3	5	1	3	3	3
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1	1
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1	5
1/3	1	1	1	3	1/3	1	1/5	1

(5.9) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 8:

1	1/5	1	1	3	1	1/3	1/3	1
5	1	5	5	7	5	3	3	5
1	1/5	1	1	3	1	1/3	1/3	1
1	1/5	1	1	3	1	1/3	1/3	1
1/3	1/7	1/3	1/3	1	1/3	1/5	1/5	1/3
1	1/5	1	1	3	1	1/3	1/3	1
3	1/3	3	3	5	3	1	1	3
3	1/3	3	3	5	3	1	1	3
1	1/5	1	1	3	1	1/3	1/3	1

(5.10) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 9:

1	3	1	1	5	3	1	3	5
1/3	1	1/3	1/3	3	1	1/3	1	3
1	3	1	1	5	3	1	3	5
1	3	1	1	5	3	1	3	5
1/5	1/3	1/5	1/5	1	1/3	1/5	1	1
1/3	1	1/3	1/3	3	1	1/3	3	3
1	3	1	1	5	3	1	3	5
1/3	1	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1	7
1/5	1/3	1/5	1/5	1	1/3	1/5	1/7	1

(5.11) Matriz de comparación de criterios para el experto nº 10:

1	1/3	1	1/3	5	1	3	1	1
3	1	3	1	5	3	5	3	3
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	1
3	1	3	1	5	3	5	3	3
1/5	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1/3
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	1
1/3	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1/3
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1	5
1	1/3	1	1/3	3	1	3	1/5	1

La matriz A, por aplicación de la media geométrica ponderada de agregación de los juicios individuales que han comparado los criterios por pares viene dada por (5.2).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.7628 & 1.0000 & 0.6123 & 4.1108 & 1.7321 & 1.7321 & 1.3110 & 2.4526 \\ 1.3110 & 1 & 1.3110 & 0.8027 & 4.7452 & 2.0189 & 1.9037 & 1.9332 & 3.2154 \\ 1.0000 & 0.7628 & 1 & 0.5774 & 3.8386 & 1.8228 & 1.7188 & 1.3797 & 2.3126 \\ 1.6332 & 1.2457 & 1.7321 & 1 & 4.8247 & 2.5150 & 2.4526 & 1.9840 & 3.1356 \\ 0.2433 & 0.2107 & 0.2605 & 0.2073 & 1 & 0.3385 & 0.3653 & 0.3033 & 0.5173 \\ 0.5774 & 0.4953 & 0.5486 & 0.3976 & 2.9542 & 1 & 1.0000 & 0.9502 & 1.9332 \\ 0.5774 & 0.5253 & 0.5818 & 0.4077 & 2.7374 & 1.0000 & 1 & 0.7569 & 1.6207 \\ 0.7628 & 0.5173 & 0.7248 & 0.5040 & 3.2972 & 1.0524 & 1.3211 & 1 & 4.2154 \\ 0.4077 & 0.3110 & 0.4324 & 0.3189 & 1.9332 & 0.5173 & 0.6170 & 0.2372 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Como se indicó anteriormente, para obtener la prioridad relativa de los distintos criterios, para el grupo de expertos consultado, se hallará el vector propio de esta matriz (A) de comparación por pares. Así pues, conforme al método de Saaty, el vector propio de dicha matriz es el vector de prioridad buscado, para hallarlo hemos de resolver el sistema lineal $A \omega = \lambda \omega$, y por tanto:

$$\det (A - \lambda I) = 0 \quad (5.13)$$

Como resultado, el vector de prioridad de los criterios es el siguiente:

$$\omega = \begin{Bmatrix} 0.1336 \\ 0.1698 \\ 0.1327 \\ 0.1997 \\ 0.0326 \\ 0.0861 \\ 0.0824 \\ 0.1121 \\ 0.0510 \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

Una vez determinado el vector de prioridad, para validar los resultados obtenidos, en los problemas de toma de decisiones se hace necesario identificar cuan buena es la consistencia de los juicios emitidos, puesto que la decisión no puede basarse en juicios con una consistencia tal que parezcan emitidos al azar. Tal como se desarrolló en el Capítulo 4, el método AHP mide el grado de inconsistencia surgida en el proceso de evaluación, con el fin de garantizar el procedimiento, ya que, como hemos apuntado, los especialistas no son siempre capaces de expresar preferencias consistentes cuando un número importante de criterios son evaluados la vez, implicando factores tangibles e intangibles.

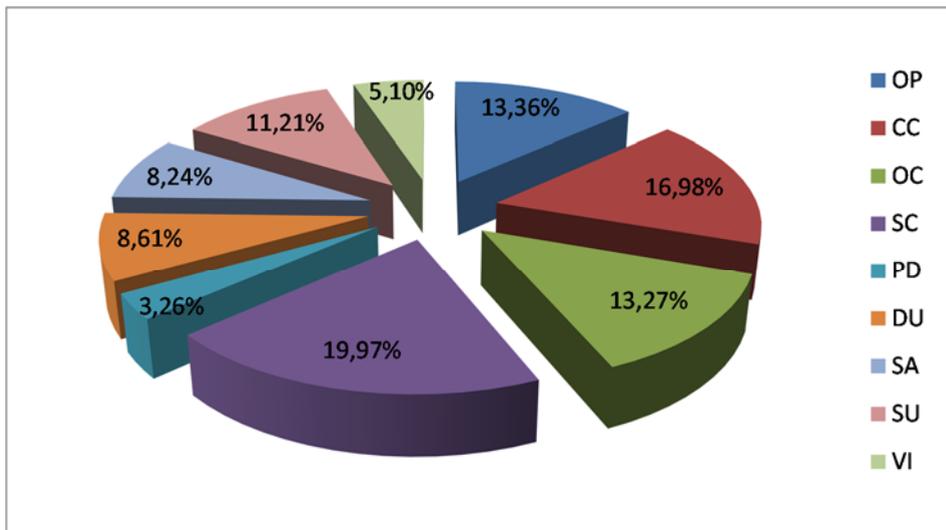


Figura 5.3. Prioridades obtenidas para cada criterio.

El método de Saaty evalúa la coherencia global de las valoraciones mediante la obtención de un ratio de consistencia (CR). En la práctica, el valor de del ratio de consistencia ha de ser del 10 por ciento o inferior ($CR \leq 0.1$), para un orden (n) de la matriz igual o mayor que 5, como es el caso. Este ratio de consistencia CR se obtiene dividiendo el índice de consistencia (CI) por el índice de consistencia aleatorio (RCI) calculado por Saaty y recogido en la tabla 4.3.

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (5.15)$$

Para calcular el (CI), se necesita el valor propio mayor (λ_{\max}) de la matriz de comparación por pares (A). Entonces, el índice de consistencia (CI) se obtiene de la siguiente forma:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5.16)$$

En el problema que nos ocupa, para la matriz de evaluación de criterios A obtenemos $\lambda_{\max} = 9,1014$ y $CR = 0,0087 < 0,1$, tal como se indica en la tabla 5.4, por lo que se verifica el requisito de consistencia de los juicios emitidos.

Tabla 5.4. Vector de prioridad y análisis de consistencia para la matriz de comparación de criterios por pares.

	OP	CC	OC	SC	PD	DU	SA	SU	VI	Priority vector
OP	1	0.7628	1.0000	0.6123	4.1108	1.7321	1.7321	1.3110	2.4526	0.1336
CC	1.3110	1	1.3110	0.8027	4.7452	2.0189	1.9037	1.9332	3.2154	0.1698
OC	1.0000	0.7628	1	0.5774	3.8386	1.8228	1.7188	1.3797	2.3126	0.1327
SC	1.6332	1.2457	1.7321	1	4.8247	2.5150	2.4526	1.9840	3.1356	0.1997
PD	0.2433	0.2107	0.2605	0.2073	1	0.3385	0.3653	0.3033	0.5173	0.0326
DU	0.5774	0.4953	0.5486	0.3976	2.9542	1	1.0000	0.9502	1.9332	0.0861
SA	0.5774	0.5253	0.5818	0.4077	2.7374	1.0000	1	0.7569	1.6207	0.0824
SU	0.7628	0.5173	0.7248	0.5040	3.2972	1.0524	1.3211	1	4.2154	0.1121
VI	0.4077	0.3110	0.4324	0.3189	1.9332	0.5173	0.6170	0.2372	1	0.0510
Consistencia: CR<0.1 OK		$\lambda_{\max} = 9.1014$		CI = 0.0127		CR = 0.0087				

5.4. Evaluación de los sistemas de almacenamiento de clínker

El paso siguiente en el proceso híbrido Delphi-APH que estamos desarrollando será la evaluación, mediante la escala fundamental de Saaty de 9 puntos, de las cuatro alternativas para el almacenamiento de clínker consideradas en el caso de estudio que nos ocupa, para cada uno de los criterios de selección. Con este fin se remiten los correspondientes cuestionarios al grupo de expertos, en la tabla 5.5 se muestra el cuestionario concerniente al criterio Coste de Construcción, para el resto de criterios considerados en el epígrafe anterior se elaborarán cuestionarios similares.

Tabla 5.5. Cuestionario para evaluar los sistemas de almacenamiento de clínker.

Con respecto al criterio " Coste de Construcción (CC)"	
Q1	Cuán preferido es Almacén Longitudinal (LSG) cuando es comparado con Silo Circular (RCS)
Q2	Cuán preferido es Almacén Longitudinal (LSG) cuando es comparado con Depósito Circular (CSG)
Q3	Cuán preferido es Almacén Longitudinal (LSG) cuando es comparado con Silo Domo (CSD)
Q4	Cuán preferido es Silo Circular (RCS) cuando es comparado con Depósito Circular (CSG)
Q5	Cuán preferido es Silo Circular (RCS) cuando es comparado con Silo Domo (CSD)
Q6	Cuán preferido es Depósito Circular (CSG) cuando es comparado con Silo Domo (CSD)

Cada especialista ha completado una comparación por pares para indicar su preferencia por cada sistema de almacenamiento de clínker. Tras ello, se construye una matriz de comparación por pares de las alternativas, utilizando la media geométrica, a partir de las respuestas obtenida de todos

los expertos. Como en la sección anterior, para obtener el vector de prioridad, ha sido utilizado método vector propio, y se efectúa el análisis de consistencia para cada caso. Para todos los criterios se realizan las evaluaciones de las cuatro alternativas consideradas, las respuestas del panel de expertos para de uno de estos criterios (CC) se muestran como ejemplo en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Resultados de evaluar los sistemas de almacenamiento de clínker para el criterio Costes de Construcción (CC).

Comparación por pares de alternativas para (CC)	Resultados para cada experto									
	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
Q1 longitudinal store (LSG) vs. round silo (RCS)	SN	MN	QP	SN	SN	SN	SN	QP	SN	SN
Q2 longitudinal store (LSG) vs. circular store (CSG)	SN	MN	SN	SN	SN	SN	SN	QP	MN	SN
Q3 longitudinal store (LSG) vs. dome (CSD)	MN	EN	SN	MN	MN	SN	MN	SN	MN	MN
Q4 round silo (RCS) vs. circular store (CSG)	QP	QP	SN	QP	QP	QP	QP	QP	SN	QP
Q5 round silo (RCS) vs. dome (CSD)	QP	SN	SN	QP	MN	SP	QP	QP	QP	QP
Q6 circular store (CSG) vs. dome (CSD)	SN	MN	QP	SN	MN	QP	SN	SN	QP	SN

A partir de estas respuestas se construyen las matrices de comparación por pares, en las tablas 5.7 a 5.15 se muestran las matrices obtenidas para cada criterio considerado, una vez agregadas las prioridades individuales, junto con su análisis de consistencia y el vector de prioridades resultante.

Tabla 5.7. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (OP).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	0,3385	0,4217	0,3192	0,1057
RCS	2,954	1	1,1161	0,8960	0,3001
CSG	2,371	0,8960	1	0,7192	0,2545
CSD	3,133	1,1161	1,3904	1	0,3398
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0018$ CI = 0,0006 RCI = 0,89 CR = 0,0007					

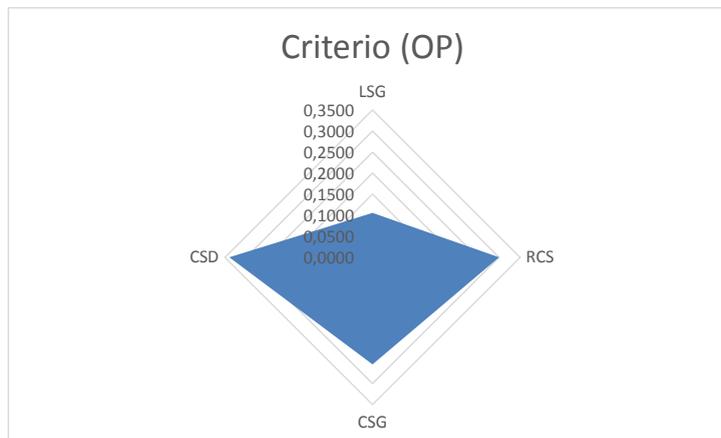


Tabla 5.8. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (CC).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	0,3946	0,3359	0,2198	0,0885
RCS	2,534	1	0,8027	0,7628	0,2430
CSG	2,977	1,2457	1	0,4185	0,2431
CSD	4,549	1,3110	2,3898	1	0,4254
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0615$ CI = 0,0205 RCI = 0,89 CR = 0,0230					

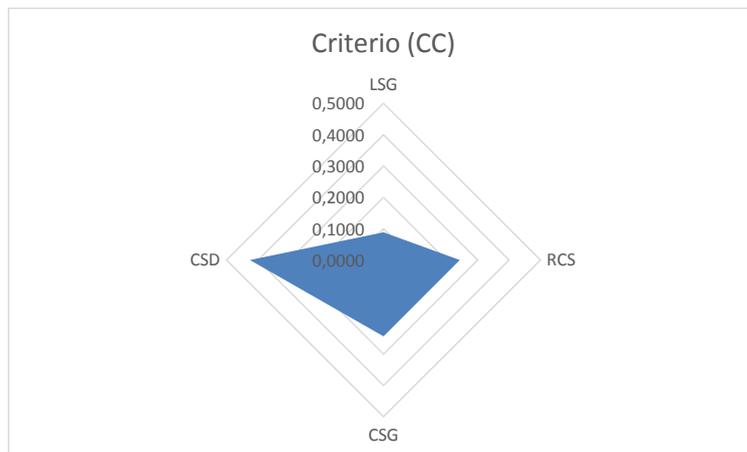


Tabla 5.9. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (OC).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	0,3010	0,3359	0,4404	0,1042
RCS	3,323	1	1,1161	1,5518	0,3513
CSG	2,977	0,8960	1	1,3904	0,3148
CSD	2,271	0,6444	0,7192	1	0,2298
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0004$ CI = 0,0001 RCI = 0,89 CR = 0,0002					

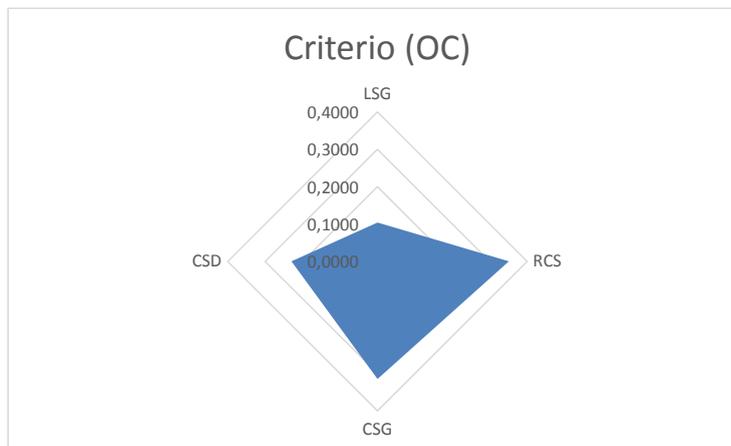


Tabla 5.10. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SC).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	3,8730	3,0000	0,4635	0,2998
RCS	0,258	1	0,5774	0,2372	0,0860
CSG	0,333	1,7321	1	0,2331	0,1188
CSD	2,158	4,2154	4,2896	1	0,4954
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0660$ CI = 0,0220 RCI = 0,89 CR = 0,0247					

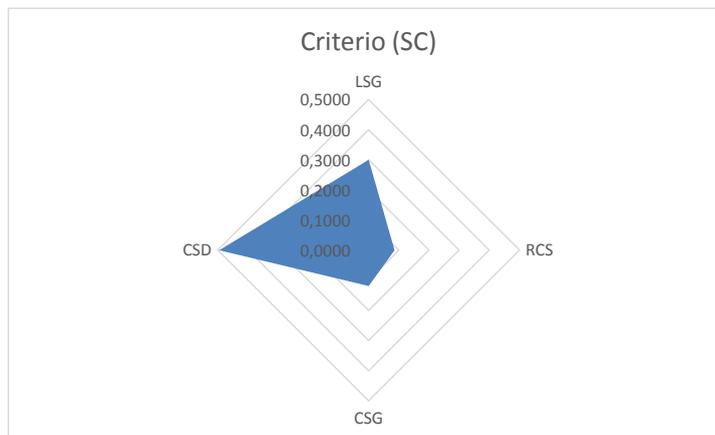


Tabla 5.11. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (PD).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	2,9770	0,4707	1,3110	0,2437
RCS	0,336	1	0,2144	0,4152	0,0874
CSG	2,125	4,6632	1	2,7374	0,4793
CSD	0,763	2,4082	0,3653	1	0,1896
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0136$ CI = 0,0045 RCI = 0,89 CR = 0,0051					

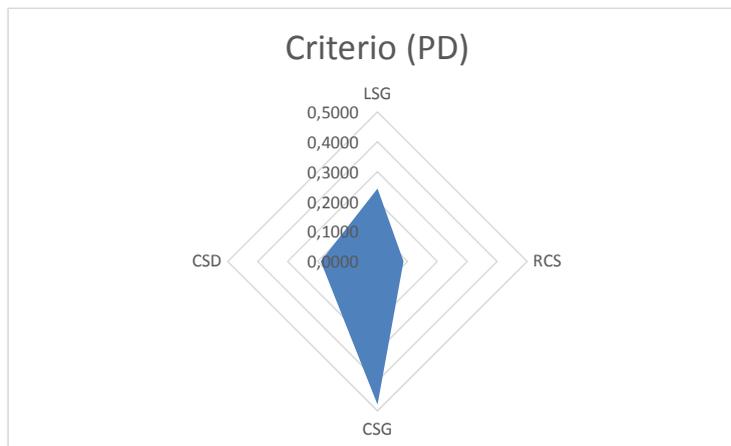


Tabla 5.12. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (DU).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	4,7452	2,8529	2,1411	0,4862
RCS	0,211	1	0,4953	0,3385	0,0909
CSG	0,351	2,0189	1	0,7192	0,1766
CSD	0,467	2,9542	1,3904	1	0,2464
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0078$ CI = 0,0026 RCI = 0,89 CR = 0,0029					

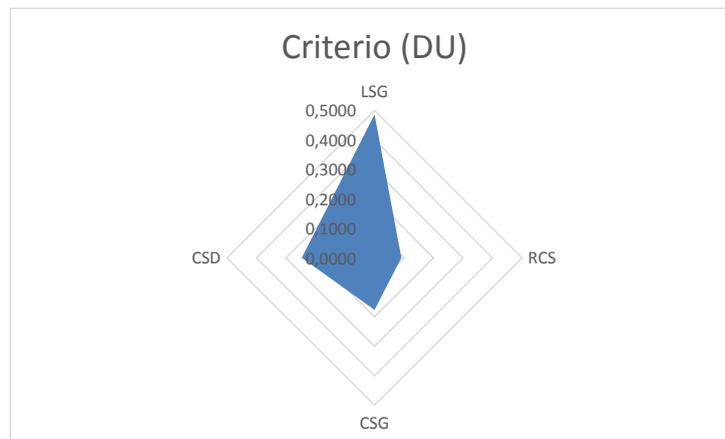


Tabla 5.13. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SA).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	2,7374	1,5399	3,1330	0,4221
RCS	0,365	1	0,5528	1,0524	0,1506
CSG	0,649	1,8089	1	2,8071	0,2998
CSD	0,319	0,9502	0,3562	1	0,1275
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0164$ CI = 0,0055 RCI = 0,89 CR = 0,0061					



Tabla 5.14. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (SU).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	1,3211	1,2457	1,6332	0,3143
RCS	0,757	1	0,6834	1,0000	0,2082
CSG	0,803	1,4633	1	1,4633	0,2807
CSD	0,612	1,0000	0,6834	1	0,1968
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0101$ CI = 0,0034 RCI = 0,89 CR = 0,0038					

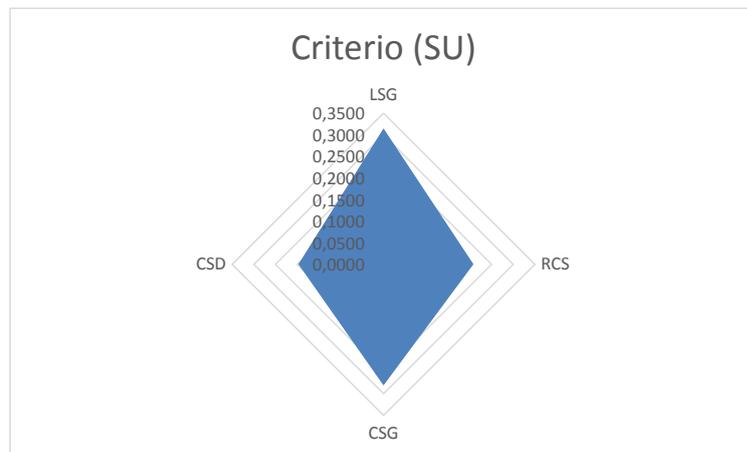
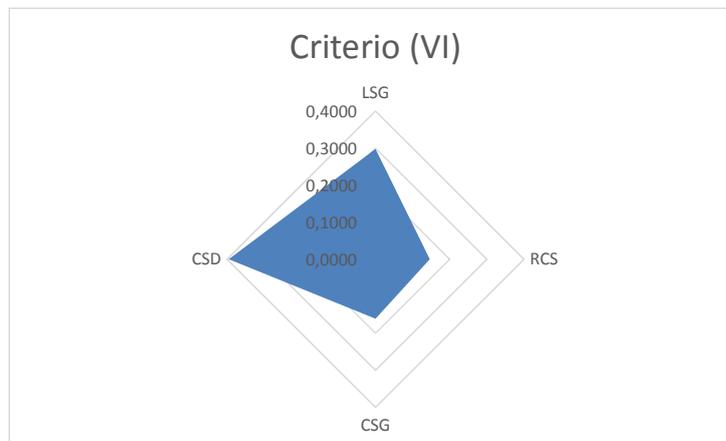


Tabla 5.15. Vector de prioridad y análisis de consistencia para el criterio (VI).

	LSG	RCS	CSG	CSD	Vector prioridades
LSG	1	2,0345	1,9332	0,7192	0,2974
RCS	0,492	1	0,8960	0,3749	0,1461
CSG	0,517	1,1161	1	0,4185	0,1608
CSD	1,390	2,6673	2,3898	1	0,3957
Consistencia: CR<0.09 OK $\lambda_{\max} = 4,0013$ CI = 0,0004 RCI = 0,89 CR = 0,0005					



A partir de los vectores de prioridades obtenidos de las cuatro alternativas, para cada uno de los nueve criterios analizados, construimos la matriz de prioridades para el problema de elección de la tipología de silo para almacenamiento de clínker más adecuado en el caso concreto estudiado.

Tabla 5.16. Matriz de prioridades para la elección del sistema de almacenamiento de clínker más adecuado.

	OP	CC	OC	SC	PD	DU	SA	SU	VI
LSG	0.1057	0.0885	0.1042	0.2998	0.2437	0.4862	0.4221	0.3143	0.2974
RCS	0.3001	0.2430	0.3513	0.0860	0.0874	0.0909	0.1506	0.2082	0.1461
CSG	0.2545	0.2431	0.3148	0.1188	0.4793	0.1766	0.2998	0.2807	0.1608
CSD	0.3398	0.4254	0.2298	0.4954	0.1896	0.2464	0.1275	0.1968	0.3957

Estas prioridades de selección se muestran gráficamente en la figura 5.4.

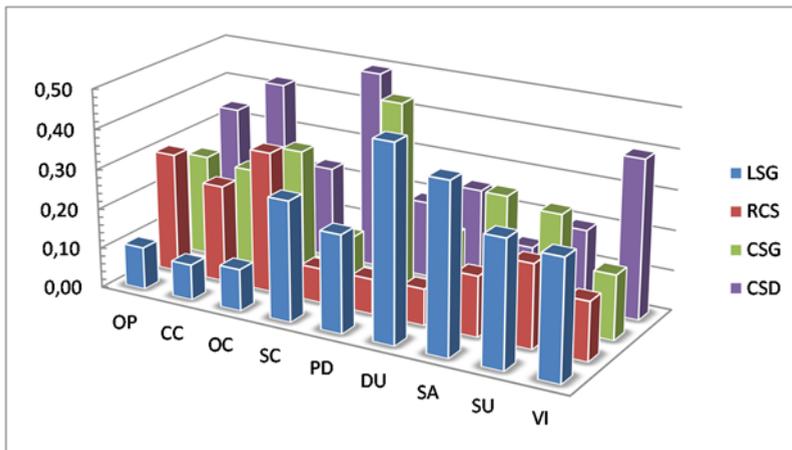


Figura 5.4. Prioridades de selección de las alternativas para cada criterio.

Continuando con la metodología de Saaty, multiplicamos esta matriz de prioridades de elección de las alternativas en función de los criterios por el vector de prioridades de los criterios obtenido en la ecuación (5.14):

$$p = \begin{Bmatrix} 0.2378 \\ 0.1990 \\ 0.2360 \\ 0.3272 \end{Bmatrix} \quad (5.17)$$

Este vector p proporciona la preferencia de elección de cada una de las alternativas para el almacenamiento de clínker estudiadas.

5.5. Priorización del sistema más adecuado

Una vez evaluados los criterios de selección y las diferentes tipologías de silos para el almacenamiento del clínker en el caso de estudio, se aplica el método VIKOR para encontrar una solución de compromiso, determinando la proximidad de cada tipología de silo con respecto a la instalación de almacenamiento ideal, asimismo se realizará un análisis de estabilidad (Opricovic S. , 2011).

Inicialmente, para las diferentes alternativas para el almacenamiento de clínker se determina el menor (f_i^-) y el mejor (f_i^*) de los valores de las calificaciones obtenidas para los diferentes criterios $j = 1, 2, \dots, n$, donde: $f_i^* = \max_i \{x_{ij}\}$ y $f_i^- = \min_i \{x_{ij}\}$. Tabla 5.17 presenta los resultados del cálculo de f_i^* y f_i^- para cada uno de los criterios de selección.

Tabla 5.17. Valores f_i^* y f_i^- para los 9 criterios considerados.

	LSG	RCS	CSG	CSD	f_i^*	f_i^-
OP	0.1057	0.3001	0.2545	0.3398	0.3398	0.1057
CC	0.0885	0.2430	0.2431	0.4254	0.4254	0.0885
OC	0.1042	0.3513	0.3148	0.2298	0.3513	0.1042
SC	0.2998	0.0860	0.1188	0.4954	0.4954	0.0860
PD	0.2437	0.0874	0.4793	0.1896	0.4793	0.0874
DU	0.4862	0.0909	0.1766	0.2464	0.4862	0.0909
SA	0.4221	0.1506	0.2998	0.1275	0.4221	0.1275
SU	0.3143	0.2082	0.2807	0.1968	0.3143	0.1968
VI	0.2974	0.1461	0.1608	0.3957	0.3957	0.1461

De acuerdo con la técnica VIKOR, calculamos los valores de S_i , R_i y Q_i usando las ecuaciones (4.7, 4.8 y 4.9) descritas en el capítulo 4 de la pre-

sente tesis doctoral. Para ello adoptamos la estrategia $v=0.5$, es decir, buscamos el máximo consenso del panel de expertos.

Tabla 5.18. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=0.5$).

	LSG	RCS	CSG	CSD
S_i	0.5712	0.6613	0.5256	0.3361
R_i	0.1698	0.1997	0.1837	0.1121
Q_i	0.6907	1.0000	0.6998	0.0000
	S^*	S^-	R^*	R^-
	0.3361	0.6613	0.1121	0.1997
Posición	1	2	3	4
S_i	CSD	CSG	LSG	RCS
R_i	CSD	LSG	CSG	RCS
Q_i	CSD	LSG	CSG	RCS

Seguidamente se ordenan las alternativas conforme a los valores de S , R y Q en orden ascendente, los resultados se incluyen en la tabla 5.18. De acuerdo con la técnica VIKOR, la solución con un menor valor de S_i es la que presenta el máximo consenso, mientras que el mínimo rechazo individual se corresponde con la solución con el mínimo valor de R_i . Asimismo, la serie Q_i nos proporciona la solución de compromiso que aúna el mayor consenso y el menor rechazo, para el caso concreto estudiado y para el grupo de expertos consultado esta solución es el Silo Domo (CSD) ya que presenta el menor valor de Q .

A continuación se analiza la estabilidad del resultado, se propone la alternativa CSD con el mejor el valor de Q (mínimo) como una solución de compromiso, siempre que se verifiquen las dos condiciones siguientes:

Condición 1 - *Ventaja aceptable*: la diferencia entre la alternativa (CSD) mejor clasificada por su valor de Q y la siguiente (LSG) es mayor que DQ, siendo $DQ = 1/(J-1)$ y J el número de alternativas, siendo en nuestro caso $J=4$.

$$(Q_{LSG} - Q_{CSD}) = 0.6907 \geq DQ = 1/3 \quad (5.18)$$

Condición 2 - *Estabilidad aceptable en la toma de decisiones*: La alternativa debe ser también la mejor calificada en las listas conforme a S y/o R. En nuestro caso se verifica que la alternativa del Silo Domo (CSD) es la mejor clasificada en las listas tanto de S como de R.

Igualmente se aplica la técnica VIKOR adoptando las estrategias de máxima utilidad ($v=1$) y de “veto” ($v=0$).

Tabla 5.19. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=1$).

	LSG	RCS	CSG	CSD
S_i	0,5712	0,6613	0,5256	0,3361
R_i	0,1698	0,1997	0,1837	0,1121
Q_i	0,7229	1,0000	0,5828	0,0000
	S^*	S^-	R^*	R^-
	0,3361	0,6613	0,1121	0,1997
Posición	1	2	3	4
S_i	CSD	CSG	LSG	RCS
R_i	CSD	LSG	CSG	RCS
Q_i	CSD	CSG	LSG	RCS

Tabla 5.20. Ranking de las alternativas para el almacenamiento de clínker ($v=0$).

	LSG	RCS	CSG	CSD
S_i	0,5712	0,6613	0,5256	0,3361
R_i	0,1698	0,1997	0,1837	0,1121
Q_i	0,6584	1,0000	0,8169	0,0000
	S^*	S^-	R^*	R^-
	0,3361	0,6613	0,1121	0,1997
Posición	1	2	3	4
S_i	CSD	CSG	LSG	RCS
R_i	CSD	LSG	CSG	RCS
Q_i	CSD	LSG	CSG	RCS

Comprobamos que aun variando la estrategia para la priorización, tanto si buscamos la mayor utilidad de la solución como si buscamos el menor rechazo individual, la solución más adecuada para el caso concreto analizado y el panel de expertos consultado resulta el Silo Domo (CSD). En cuanto a las condiciones de estabilidad se comprueba que se cumple la Condición 1:

$$\text{Si } v=1, \quad (Q_{CSG} - Q_{CSD}) = 0.5825 \geq DQ = 1/3 \quad (5.19)$$

$$\text{Si } v=0, \quad (Q_{LSG} - Q_{CSD}) = 0.6524 \geq DQ = 1/3 \quad (5.20)$$

Y también la Condición 2, puesto que el Silo Domo es también la alternativa mejor clasificada conforme a S y R. Observamos que para la segunda de las opciones sí que se produce un cambio en función de la estrategia de priorización adoptada, si buscamos la máxima utilidad para el grupo la segunda de las alternativas sería (CSG) el depósito circular

($v > 0.5$), mientras que si buscamos el mayor consenso o la estrategia con “veto” lo sería el Almacén longitudinal (LSG), ambas soluciones han presentado niveles de utilidad para el grupo y de rechazo individual muy próximos. En cuanto a la opción menos preferida, para los distintos escenarios considerados en este caso particular sería el Silo Cilíndrico (RCS). En la figura 5.5 se muestra de forma gráfica una comparativa de los diferentes valores de la serie Q_i en función de la estrategia de priorización adoptada.

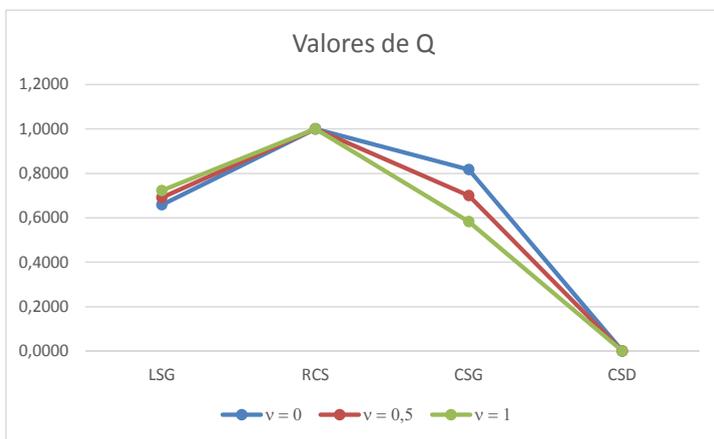


Figura 5.5. Comparación de las estrategias de priorización.

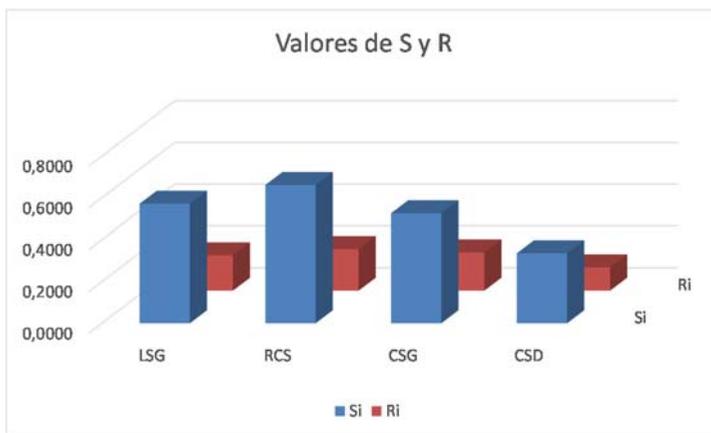


Figura 5.6. Mayor utilidad (S_{min}) y menor rechazo individual (R_{min}).

Así pues, en la toma de decisiones podría validarse la solución así obtenida (CSD), denominada solución de compromiso, puesto que es la alternativa que presenta una mayor aceptación de la mayoría (representada por S mínima), y un rechazo mínimo individual del oponente o del resto del grupo (representado por R mínima).

Capítulo 6

Resultados y conclusiones

Las instalaciones de almacenamiento de materiales son esenciales en la industria para la gestión de los procesos de producción y control de stocks, así como para el desarrollo de grandes obras de ingeniería civil. Tradicionalmente, la selección de la tipología del sistema de almacenamiento se ha basado en la experiencia del director del proyecto, o en criterios puramente económicos, aunque no es necesariamente la solución óptima desde un punto de vista global.

Ante la escasa documentación científica existente en lo relativo a las distintas tipologías de silos empleadas hoy en día para el almacenamiento de clínker en la industria cementera y sus ámbitos de aplicación, en la presente tesis doctoral se ha realizado un análisis de las mismas, reseñando sus principales características y procedimientos de construcción. Igualmente, las mencionadas incertidumbres en el procedimiento de elección del tipo de silo más adecuado en caso concreto, justifican la necesidad de

desarrollar herramientas para resolver el problema de la toma de decisiones y priorizar de este modo la solución a adoptar.

En el caso particular estudiado, la tipología de silo preferida para el almacenamiento de clínker ha resultado el Silo Domo (CSD). Asimismo, se observa que tras alternativa preferida se encuentran las soluciones consistentes en el almacén longitudinal (LSG) y el depósito circular (CSG), presentando ambas niveles de consenso similares y finalmente, para este caso concreto, el silo circular (RCS) fue la alternativa que despertó un mayor rechazo individual por parte del panel de expertos consultado.

Se trata pues de un problema de toma de decisiones donde se ven involucrados factores intangibles y no conmensurables, que pueden entrar en conflicto entre sí. Para resolver el complejo problema, hemos recurrido a un panel de expertos ingenieros que, utilizando el método Delphi-AHP, han identificado y evaluado los criterios más relevantes para la toma de decisiones en el caso concreto analizado, la figura 6.1 presenta los pesos resultantes para cada factor.

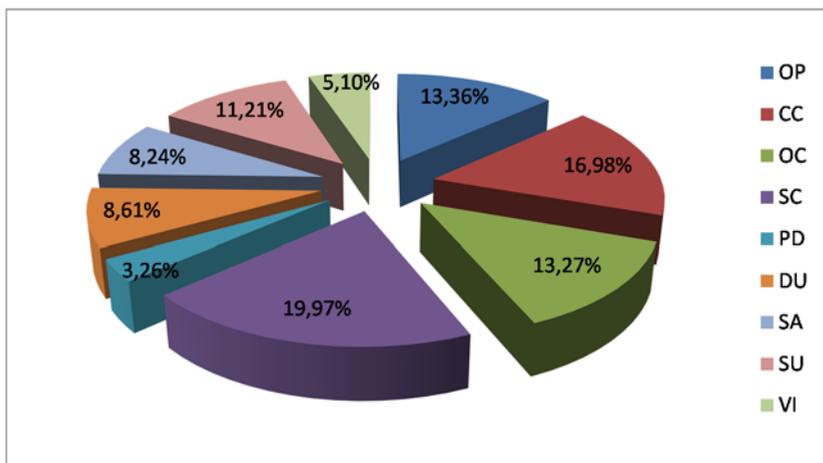


Figura 6.1. Prioridades obtenidas para cada criterio expresadas en porcentajes.

Para todos estos criterios, las alternativas propuestas se han comparado, la figura 6.2 muestra los pesos de cada tipología de instalación para cada criterio de selección considerado. Y, por último, la técnica VIKOR nos ha permitido seleccionar la solución de compromiso, proporcionando el mayor consenso y garantizando la estabilidad.

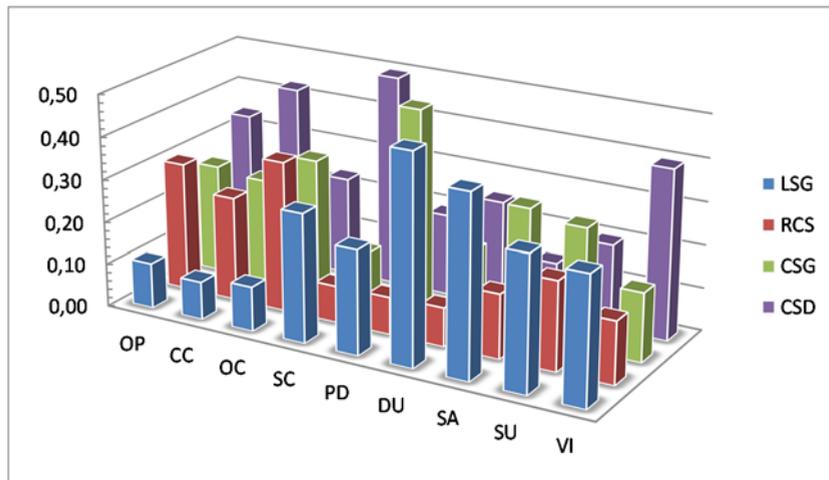


Figura 6.2. Prioridades de elección de las tipologías para los criterios considerados.

Por lo tanto, el problema que se analiza en este trabajo es un ejemplo de la fiabilidad del método propuesto para la determinación de la tipología más adecuada para el almacenamiento de materiales, es decir, la solución más cercana a la ideal, incluso si están involucrados factores intangibles y difícilmente cuantificables.

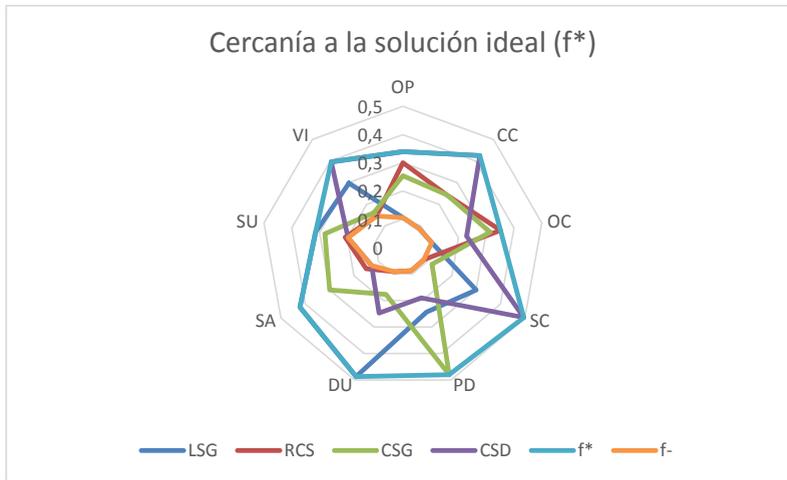


Figura 6.3. Cercanía a la solución ideal.

Asimismo cabe señalar que, partiendo del trabajo desarrollado en la presente tesis doctoral, es posible abrir otros ámbitos de investigación así como continuar las investigaciones realizadas en diversas direcciones, a saber:

- Puesto que la metodología propuesta es estructurada, analítica y objetiva, puede aplicarse a otros problemas concretos de toma de decisiones para la selección de la tipología de silo para clínker más adecuado en cualquier otra implantación cementera, debiendo establecerse en cada caso concreto los criterios de selección más importantes para la toma de la decisión. Además de esto, el método no se limita al campo de las estructuras de almacenamiento, sino que también presenta un potencial más amplio y se puede aplicar en diferentes problemas de gestión de recursos y toma de decisiones en ingeniería civil e industrial.
- Asimismo sería factible abrir una línea de trabajo con el fin de analizar una planta de producción de cemento en su totalidad, plan-

teando una estructura jerárquica global y estudiando la interrelación de los criterios de selección de cada una de las instalaciones que la componen, de modo que sea posible adoptar las tipologías óptimas para el conjunto de los sistemas que conforman la planta de producción.

- Podría también plantearse la introducción de nuevas alternativas para solucionar el almacenamiento del clínker, diferentes de las comúnmente aceptadas hoy en día. Su consideración y evaluación mediante la metodología propuesta permitiría arrojar luz sobre su viabilidad.
- Finalmente, cabe citar la posibilidad de aplicar el método de investigación propuesto a instalaciones ya ejecutadas y en funcionamiento, para así analizar los factores que condicionaron su elección y evaluar la idoneidad de las soluciones adoptadas.

Capítulo 7

Referencias bibliográficas

- Aguirre, J. (2010). Foundation for silos in soft subsoil, with rigid inclusions. *Ground Improvement Technologies and Case Histories*, 671-676.
- Al-Harbi, K. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19, 19-27.
- Alsop, P. (2014). *The Cement Plant Operations Handbook* (6th ed.). Tradeship Publications Ltd.
- Anonymous. (2012). Facilitating storage, flow and conveying. *ZKG International*, 65(12), 35-39.
- Auxilia, G. (2009). Large storage capacity cement silos and clinker deposit on a near-shore sandy fill using piles for soil improvement and settlement reduction. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, (págs. 1181-1184). Alexandria.
- Ayuga, F. (1995). Los empujes del material almacenado en silos. *Informes de la Construcción*, 46(436), 27-34.
- Baracaño Coronas, J. R., & Pérez Alonso, J. (1976). Estudio sobre el contenido óptimo de yeso en los cementos, su influencia en las resistencias iniciales. *Materiales de Construcción*, 26 (164), 5-24.

- BCG. (2013). *The Cement Sector: A Strategic Contributor to Europe's Future*. New York: Boston Consulting Group.
- Bowden, R. J. (1989). Feedback forecasting games: an overview. *Journal of Forecasting*, 8, 126.
- Brown, B., & Helmer, O. (1964). Improving the reliability of estimates obtained from a consensus of experts. *The Rand Corporation*.
- Bye, G. C. (1999). *Portland Cement: Composition, Production and Properties*. Thomas Telford.
- Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2013). Assessing governance issues of urban utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33(1), 82-87.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., & Calvo, V. (2013). Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space. *Expert Systems with Applications*, 40(11), 4707-4714.
- Caquot, A., & Kerisel, J. (1956). *Traité de mécanique des sols*. Gauthier-Villars.
- Cedano de León, D. C. (2012). *Valorización energética de residuos como combustibles alternativos en plantas cementeras*. Universitat Politecnica de Valencia: Tesis Doctoral.
- Cembureau. (2013). *Annual Report*. Brussels: The European Cement Association.
- CEN. (2011). *Norma EN 197-1 Cemento. Parte 1: Composiciones, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comune*. Bruselas: Comité Europeo de Normalización.
- Choisy, A. (1999). *El arte de construir en Roma*. Barcelona: Reverté.
- Curiel-Esparza, J., & Canto-Perello, J. (2012). Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(6), 506-514.
- Dalkey, N. C. (1967). Delphi. *The Rand Corporation*, P-3704.
- Dalkey, N. C., Brown, B., & Cochran, S. (1970). The Delphi Method, III: Use of self ratings to improve group estimates. *Technological Forecasting and Social Change*, 1, 283-291.
- Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi Method to the use of experts. *Management Science*, 9, 458-467.

- Dembla, A. K., & Mersmann, M. (2007). Experiences with the design of large size cement plants - Process and layout considerations in pyroprocess systems. *Experiences with the design of large size cement plants*, (págs. 114-122). New York.
- Duckstein, L., & Opricovic, S. (1980). Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research*, 16(1), 14-20.
- Elsen, J., Cizer, O., & Snellings, R. (2013). Lessons from a lost technology: The secrets of roman concrete. *The American mineralogist*, 98, 1917-1918.
- Elzea Kogel, J., Trivedi, N. B., & Krukowsk, S. T. (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets and Uses* (7 ed.). SME.
- Esade, & Andersen. (1995). *El directivo del futuro*. Deusto.
- European Commission, J. R. (2013). *Best Available Techniques Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Brussels/Belgium: European Commission European IPPC Bureau,.
- Fabbrocino, G., Iervolino, I., & Manfredi, G. (2002). Structural issues in seismic risk assessment of existing oil storage tanks. *Risk Analysis*, 3, 295-304.
- Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 108, 165-169.
- Galanc, T., & Mikus, J. (1986). The choice of an optimum group of experts. *Technological Forecasting and Social Change*, 30, 245-250.
- García Fernandez, R., Pizarro García, C., Gutiérrez Lavín, A., Bueno de las Heras, J. L., & Juan Pis, J. (2013). Influence of physical properties of solid biomass fuels on the design and cost of storage installations. *Waste Management*, 33(5), 1151-1157.
- Gener, M., & Alonso, J. M. (2002). Influencia de la composición mineralógica de puzolanas naturales en las propiedades de cementos con adiciones. *Materiales de construcción*, 52 (267), 73-77.
- Godet, M. (1987). *Scenarios and Strategic Management*. Londres: Butterworth Scientific.
- Goñi, S., Guerrero, A., Macias, M. A., Peña, R., & Fernández Escalante, E. (2008). Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites*, 30, 798-805.
- Gordon, T. J., & Helmer, O. (1964). Report on a long-range study. *The Rand Corporation*, P-2982.

- Gracht, H. (2012). Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(12), 1525-1536.
- Groenewald, H., Vosloo, J. C., & Mathews, E. H. (2012). Cost-benefit to the cement industry by shifting evening load to off-peak periods. *Proceedings of the 9th Industrial and Commercial use of Energy Conference (icue)* (págs. 1-6). Cape Town: Cape Peninsula Univ Technology.
- Gutteridge, W. A., & Dalziel, J. A. (1990). Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part 2: Fine hydraulic binders. *Cement and Concrete Research*, 20 (6), 853-861.
- Harder, J. (2012). Feasibility of sustainability scenarios. *ZKG international*, 65(8), 46-54.
- Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (4ª ed.). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú .
- Hasanbeigi, A., Lobscheid, A., Lu, H., Price, L., & Dai, Y. (2013). Quantifying the co-benefits of energy-efficiency policies: A case study of the cement industry in Shandong province, China. *Science of the Total Environment*, 458-460, 624-636.
- Helmer, O., & Quade, E. S. (1963). An approach to the study of a developing economy by operational gaming. *The Rand Corporation*, P-2718.
- Helmer, O., & Rescher, N. (1959). On the epistemology of inexact sciences. *Management Science*, 6(1), 25-52.
- Hernandez, O. D., Quiroz, J. A., & Ortiz Valencia, P. A. (2014). Modelo del sistema de combustión de un horno de Clínker de proceso húmedo. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 329-354.
- Hillewaere, J., Degroote, J., Lombaert, G., Vierendeels, J., & Degrande, G. (2013). Computational aspects of simulating wind induced ovaling vibrations in silo groups. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 246, 161-173.
- Holland, T. C. (2005). *Silica fume user's manual*. Washington: Federal Highway Administration.
- Hsu, C., & Sandord, B. (2007). The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical Assessment, Research and Evaluation*, 12(10), 1-7.
- Kacimi, L., Simon-Masseron, A., Ghomari, A., & Derriche, Z. (2006). Reduction of clinkerization temperature by using phosphogypsum. *Journal of hazardous materials*, 137(1), 129-137.

- Kaplan, A., Skogstad, L., & Girshick, M. (1950). The prediction of social technological events. *Public Opinion Quarterly*, 93-110.
- Keil, F. (1973). *Cemento: fabricación, propiedades, aplicaciones*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Kok, L. B., & Hui, Y. M. (2010). Protection of aged cement clinker silo against high impact and high temperature discharge. *Advances in FRP Composites in Civil Engineering* (págs. 415-418). Berlin: Tsinghua University Press, Beijing and Springer Berlin Heidelberg.
- Landeta, J. (2002). *El Método Delphi. Una técnica de previsión del Futuro*. Barcelona: Ariel.
- Lee, G. K., & Chan, E. H. (2008). The analytic hierarchy process (AHP) approach for assessment of urban renewal proposals. *Social Indicators Research*, 89(1), 155-168.
- Li, X., Yu, H., & Yuan, M. (2012). Modeling and Optimization of Cement Raw Materials Blending Process. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 30.
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The Delphi Method. Techniques and applications*. Addison-Wesley.
- Lippold, D. (2012). Post-tensioned silo walls with high post-tensioning degree and transient temperature effects. *Beton und Stahlbetonbau*, 107(10), 679-689.
- Liu, C., Wu, P., & Wang, L. (2013). Particle climbing along a vibrating tube: A vibrating tube that acts as a pump for lifting granular materials from a silo. *Soft Matter*, 9(19), 4762-4766.
- Loczy, D., Gyenizse, P., Ronczyk, L., & Dezso, J. (2007). Damage to the landscape caused by cement industry in southern transdanubia. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 30(2), 209-213.
- Martin-Utrillas, M., Azorín-Carrión, A., Cantó-Perelló, J., & Curiel-Esparza, J. (2015). Multi-criteria decision-making model for establishing the optimal typology for clinker storage silos. *ZKG international*, 68(1-2), 50-58.
- Martin-Utrillas, M., Juan-Garcia, F. M., Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2014). Optimal infrastructure selection to boost regional sustainable economy. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. doi:10.1080/13504509.2014.954023
- Martin-Utrillas, M., Reyes-Medina, M., J., C.-E., & Canto-Perello, J. (2014). Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in

- waste treatment and valorization plants of landfills. *Clean Technol Environ Policy*.
- Mikulcic, H., Vujanovic, M., & Duic, N. (2013). Reducing the CO₂ emissions in croatian cement industry. *Applied Energy*(101), 41-48.
- Mistikova, Z., & Jendzelovsky, N. (2012). Static analysis of the cylindrical tank resting on various types of subsoil. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(5), 744-751.
- Monshi, A., & Asgarani, M. K. (1999). Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cement and Concrete Research*, 29 (9), 1373–1377.
- Moussaceb, K., & Merabet, D. (2012). Homogenization and Management of Cement Quality from Raw Materials to the Finished Product Using a Numerical Method of Mixture Calculation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37 (1), 41-57.
- Navia, R., Rivela, B., Lorber, K., & Méndez, R. (2006). Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(4), 339–356.
- Niemeyer, H., & Kuster, T. (1997). The dome silo for storing cement clinker and cement raw materials. *ZKG international*, 50(6), 301-&.
- Opricovic, S. (1998). *Multicriteria Optimization in Civil Engineering*. Belgrade, Serbia: Faculty of Civil Engineering.
- Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 38, 12983–12990.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455.
- Owens, K., Russell, M. I., Donnelly, G., Kirk, A., & Basheer, P. A. (2014). Use of nanocrystal seeding chemical admixture in improving portland cement strength development: Application for precast concrete industry. *Advances in applied ceramics*, 8(113), 478-484.
- Pashiardis, P. (1993). Group decision making: the role of the principal. *International Journal of Educational Management*, 7(2), 8-11.
- Pay-Haung, S., Juu-En, C., & Li-Choung, C. (2003). Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash. *Cement Concrete Research*, 33(11), 1831–1836.

- Pill, J. (1971). The Delphi Method: Substance, context and annotated bibliography. *Socio-Economic Sciences*, 5, 60.
- Radandt, S. (2012). Assessing the explosion risk of plants for dusty, granular and combustible products example of a risk assessment procedure for a fluid bed spray granulator . *Measurement and Control of Granular Materials.*, (págs. 101-105). Stafa-Zurich.
- RC-08. (2008). *Instrucción para la recepción de cementos.* . Madrid: Ministerio de Fomento. Secretaria central técnica. Centro de publicaciones.
- Reimbert, M. (1943). Recherches nouvelles sur les efforts exercés par les matières pulvérulentes ensilées sur les parois des silos. *Annales FTBTP*(11), 1-48.
- Rowe, G., & Wright, G. (1996). The impact of task characteristics on the performance of structured group forecasting techniques. *International Journal of Forecasting*, 12(1), 73-89.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2008). *Decision Making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for decisions in a complex world*. Pittsburgh: University of Pittsburgh.
- Saaty, T. L. (2013). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Sackman, H. (1974). Delphi assesment: expert opinion, forecasting and group process. *The Rand Corporation, R-1283-PR*.
- Sadowski, A. J., & Rotter, J. M. (2013). Buckling: Eccentrically Discharged Silos and the Assumed Pressure Distribution. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(7), 858–867.
- Salancik, J. R., Wenger, W., & Helfer, E. (1971). The construction of Delphi event statements. *Technological Forecasting and Social Change*, 3, 65-73.
- Sambashivan, B. V. (2011). Types of Storage and their Evaluation. *Bulk Solids Handling: the International Journal of Storing and Handling Bulk Materials*.
- Sanjuán Barbudo, M. Á., & Chinchón Yepes, S. (2004). *El cemento Pórtland. Fabricación y expedición*. Servicio de Publicaciones Univerisidad de Alicante.

- Sanjuán Barbudo, M. A., & Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Sanjuán, M. A., & Argiz, C. (2012). Nota Técnica: La nueva norma europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2011. *Materiales de Construcción*(307), 425-430.
- Sayadi, M. K., Heydari, M., & Shahanaghi, K. (2009). Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. *Applied Mathematical Modelling*, 33(5), 2257-2262.
- Singh, M., Upadhayay, S., & Prasad, P. (1996). Preparation of special cements from red mud. *Waste Management*, 16(18), 665–670.
- Skempton, A. W. (1991). *John Smeaton FRS*. Institution of Civil Engineers (ICE).
- Spetzler, C. S., & Von Holstein, C. A. (1975). Probability encoding in decision analysis. *Management Science*, 22(3), 340-358.
- Stynoski, P., Mondal, P., & Marsh, C. (2015). Effects of silica additives on fracture properties of carbon nanotube and carbon fiber reinforced portland cement mortar. *Cement & Concrete Composites*(55), 232-240.
- Syamsuddin, I., & Hwang, J. (2010). The use of AHP in security policy decision making: an open office calc application. *Journal of Software*, 5(10), 1162-1169.
- Teichler, W. (2010). Modernization of the polish cement plant nowiny, optimizing the operating and investment costs. *ZKG International*, 55(10), 42-47.
- Ténière Buchot, P. F. (1972). *Le Progres Scientifique*, 156-57.
- Vargas, L. G. (1990). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European journal of operational research*, 48(1), 2-8.
- Wan, J. (2014). Nonlinear analysis and construction method of a silo dome with grain. *Applied mechanics and materials*. 501-504, págs. 2213-2216. STAFA-ZURICH: Trans Tech Publications.
- Wilson, A. (2013). Integrated quality assurance from the quarry to the raw meal silo. *ZKG International*, 66(10), 40-49.
- Yu, P. L. (1973). A class of solutions for Group Decision Problems. *Management Science*, 19(8), 936-946.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamosaitiene, J. (2011). Selection of construction enterprises management strategy based on SWOT & multi-criteria analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1063–1082.

Zeleny, M., & Cochrane, J. L. (1973). *Multiple criteria decision making*. University of South Carolina Press.

Zhao, Y., Cao, Q., & Su, L. (2013). Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure. *Thin-Walled Structures*, 73, 337–349.

ANEJO

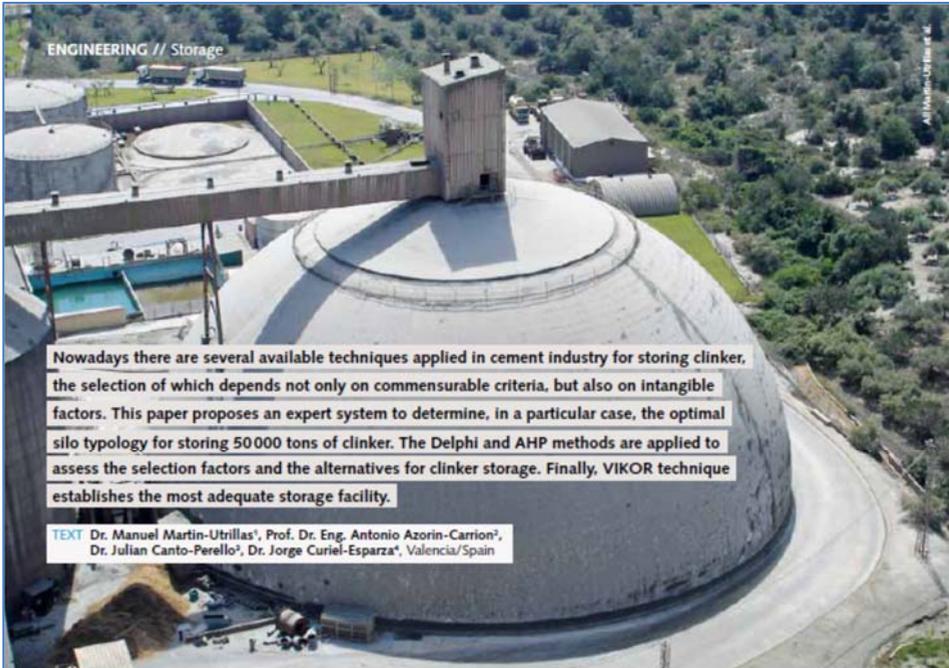
Artículo publicado

En el curso de la realización de la presente tesis doctoral, se ha redactado un artículo que fue remitido a la revista de ámbito internacional ZKG INTERNATIONAL, "*Zement Kalk Gips – Cement Lime Gypsum*", con ISSN 0949-0205, siendo aceptado para su publicación y posteriormente publicado en febrero de 2015. En la siguiente tabla se recogen los datos de dicha revista en correspondientes a la fecha de publicación del referido artículo.

Asimismo se adjuntan la página inicial y final de la publicación (Martin-Utrillas, Azorín-Carrión, Cantó-Perelló, & Curiel-Esparza, 2015), cuya referencia figura en el capítulo bibliográfico.

Tabla A.1. Datos de la revista ZKG International.

Full Journal Title:	ZKG INTERNATIONAL
ISO Abbrev. Title:	ZKG Int.
JCR Abbrev. Title:	ZKG INT
ISSN:	0949-0205
Issues/Year:	12
Language:	MULTI-LANGUAGE
Journal Country/Territory:	GERMANY
Publisher:	BAUVERLAG BV GMBH
Publisher Address:	AVENWEDDER STR 55, 33311 GUTERSLOH, GERMANY
Subject Categories:	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY



Nowadays there are several available techniques applied in cement industry for storing clinker, the selection of which depends not only on commensurable criteria, but also on intangible factors. This paper proposes an expert system to determine, in a particular case, the optimal silo typology for storing 50 000 tons of clinker. The Delphi and AHP methods are applied to assess the selection factors and the alternatives for clinker storage. Finally, VIKOR technique establishes the most adequate storage facility.

TEXT Dr. Manuel Martín-Utrillas¹, Prof. Dr. Eng. Antonio Azorín-Carrión², Dr. Julian Canto-Perello³, Dr. Jorge Curiel-Esparza⁴, Valencia/Spain

Clinker storage dome (CSD)

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Multi-criteria decision-making model for establishing the optimal typology for clinker storage silos

1 Introduction

The contribution of the concrete and cement industry to the economy represents a total production value of 74 billion € and a value added of 22 billion €, accounting for 366 000 jobs [1]. In 2020 a production of about 242 million tons of clinker is estimated. Large store structures play an important role in the manufacturing process of cement, ensuring the management of raw and intermediate materials and the storage of the final product. These storage silos are essential to manage the fluctuations between the supply of materials and their implementation in the production process or between the sales of the final product and its production. Hence the correct choice of the appropriate storage system will have a significant impact on the management of production processes and on the economic profits obtained. There are many tech-

niques to determine the pressures exerted by stored materials and to approach the design of silos or its associated mechanical equipment [2-4]. However, there is a research lack regarding the choice of the most appropriate storage typology in each case, as the first and key step to optimal design.

The election of the type of silo depends not only on commensurable criteria, such as the construction cost, but also on intangible and not easily quantifiable factors. In this decision-making problem, the project manager generally needs to identify important decision factors and to evaluate their relative importance in order to establish the most preferred facility. The selection of optimal silo typology consists of essential management criterion such as: Construction costs i.e., the setting up costs and the necessary mechanical equipment for its operation [5-7]; Operating costs, including

^{1,4} Physical Technologies Center, Universitat Politècnica de València, Valencia/Spain

^{2,3} Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universitat Politècnica de València, Valencia/Spain

REFERENCES

- [16] Fabbrocio, G.; Iervolino, I.; Manfredi, G.: Structural issues in seismic risk assessment of existing oil storage tanks, *Risk Analysis* 3 (2002), pp. 295–304
- [17] Becker, R. 2012. Explosion protection in coal or alternative fuel storage silos, *ZKG International* 65 (2012), No. 6, pp. 38–41
- [18] Curiel-Esparza, J.; Canto-Perello, J.: Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 19 (2012), No. 6, pp. 506–514
- [19] Mikulcic, H.; Vujanovic, M.; Duic, N.: Reducing the CO₂ emissions in Croatian cement industry, *Applied Energy* 101 (2013), pp. 41–48
- [20] Hasanbeigi, A.; Lobscheid, A.; Lu, H.; Price, L.; Dai, Y.: Quantifying the CO-benefits of energy-efficiency policies: A case study of the cement industry in Shandong province, China, *Science of the Total Environment* 458–460 (2013), pp. 624–36
- [21] Amador-Jimenez L.; Willis C.J.: Demonstrating a correlation between infrastructure and national development, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19 (2012), No. 3, pp. 197–202
- [22] Harder, J.: Feasibility of sustainability scenarios, *ZKG International* 65 (2012), No. 8, pp. 46–54.
- [23] Loczy, D.; Gyenizse, P.; Ronczyk, L.; Dezso, J.: Damage to the landscape caused by cement industry in southern transdanubia, Hungary, *Geografica Fisica e Dinamica Quaternaria* 30 (2007), No. 2, pp. 209–213
- [24] Scheifele, B.: New clinker plant and cement grinding facility, *ZKG International* 65 (2012), No. 11, pp. 6
- [25] Heine, W.: Transport and storage technology for cement clinker. *ZKG International* 49 (1996), No. 12, pp. 665–677
- [26] Cembureau: Best available techniques for the cement industry, The European Cement Association. (1999) Brussels/Belgium
- [27] Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York. (1980) USA
- [28] Canto-Perello, J.; Curiel-Esparza, J.; Calvo, V.: Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space, *Expert Systems with Applications* 40 (2013), No. 11, pp. 4707–4714
- [29] Martin-Utrillas, M.; Juan-Garcia, F. M.; Canto-Perello, J.; Curiel-Esparza J.: Optimal infrastructure selection to boost regional sustainable economy, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* (2014), DOI 10.1080/13504509.2014.954023
- [30] Lee, G. K. L.; Chan, E. H. W.: The analytic hierarchy process (AHP) approach for assessment of urban renewal proposals, *Social Indicators Research* 89 (2008), No. 1, pp. 155–168
- [31] Syamsuddin, I.; Hwang, J.: The use of AHP in security policy decision making: An open office calc application, *Journal of Software* 5 (2010), No. 10, pp. 1162–1169
- [32] Hsu, C. C.; Sandord, B.A.: The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical Assessment, Research and Evaluation* 12 (2007), No. 10, pp. 1–7
- [33] Gracht, H.A.: Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change* 79 (2012), No. 8, 1525–1536
- [34] Opricovic, S.: *Multicriteria Optimization in Civil Engineering*. 302 p. Faculty of Civil Engineering (1998), Belgrade/Serbia
- [35] Martin-Utrillas, M.; Reyes-Medina, M.; Curiel-Esparza J.; Canto-Perello, J.: Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in waste treatment and valorization plants of landfills, *Clean Technol Environ Policy* (2014), DOI 10.1007/s10098-014-0834-4
- [36] Joint Research Centre: Best Available Techniques Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. European Commission (2013), European IPPC Bureau, Brussels/Belgium
- [37] Liu, C.; Wu, P.; Wang, L.: Particle climbing along a vibrating tube: A vibrating tube that acts as a pump for lifting granular materials from a silo, *Soft Matter* 9 (2013), No. 19, pp. 4762–4766
- [38] Elzea Kogel, J.; Trivedi, N. Barker, J. M.; Krukowsk, S. T.; *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses* (2006), 7th ed. SME
- [39] Anonymous: Facilitating storage, flow and conveying. *ZKG International* 65 (2012), No. 12, 35–39
- [40] Sambashivan, B.V.: Types of Storage and their Evaluation. *Bulk Solids Handling: the International Journal of Storing and Handling Bulk Materials* (2011), Würzburg/Germany.
- [41] Curiel-Esparza, J.; Canto-Perello, J.: Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13 (2013), No. 2, 276–285.
- [42] Saaty, T. L.: *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. 1st ed. (2013) RWS Publications
- [43] Opricovic, S.: Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning, *Expert Systems with Applications* 38 (2011), pp. 12983–12990