

2012

Optimización del Esqueleto Granular

Optimización del esqueleto granular mediante la utilización del método de superficie de respuestas (MSR). Diseño de mezclas.

Autor: Pedro José Agustín Ortega

Tutores: Dr. Carlos José Parra Costa

Dr. Eusebio José Martínez Conesa







Agradecer al Centro Tecnológico de la Construcción su ayuda en la elaboración de este proyecto de investigación, y particularmente, a Carlos Rodríguez, que estuvo presente en todo momento.



Gracias a todas las personas que me han apoyado durante todo este tiempo, no solo en el proceso de investigación y elaboración de este proceso, sino a todas las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí. Desde mis amigos que siempre han estado conmigo, hasta mi familia, que me ha criado e inculcado los valores que hoy en día represento.

Mil gracias.

Este proyecto va dedicado a ti iaio.



INDICE



1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. OBJETIVO	15
1.2. INTRODUCCIÓN.....	15
1.3. RESUMEN POR CAPÍTULOS	17
2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1. ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	20
2.2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA COMPACIDAD DEL ARIDO	24
3. LOS ÁRIDOS	27
3.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS	27
3.2. CLASIFICACIÓN.....	29
3.3. EL RECORRIDO DE LOS ÁRIDOS	31
3.4. LA OBTENCIÓN DE LOS ÁRIDOS	33
3.5. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y RECICLADO.....	35
3.6. APLICACIONES Y USOS DE LOS ÁRIDOS.....	39
3.7. PRODUCTOS Y MATERIALES	40
3.8. LOS ÁRIDOS EN ESPAÑA	42
3.9. LOS ÁRIDOS EN EL MUNDO	43
3.10. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES	44
3.10.1. MÉTODO DE FÜLLER.....	45
3.10.2. MÉTODO DE BOLOMEY.....	48
3.10.3. MÉTODO DE FAURY	51
3.10.4. MÉTODO ACI	55
3.10.5. MÉTODO DE LA PEÑA	57
3.11. OTRAS METODOLOGÍAS.....	60
3.11.1. MÉTODOS CON GRANULOMETRÍAS DISCONTINUAS	61



3.11.2. MÉTODOS BASADOS EN MEZCLAS DE PRUEBA	62
3.11.3. MÉTODO DE O'REILLY	63
3.11.4. MÉTODO DE POPOVICS.....	64
3.11.5. RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC 70-OMD.....	65
4. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA Y DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS	68
4.1. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS	68
4.1.1. LA IMPORTANCIA DE PLANIFICAR LA EXPERIMENTACIÓN	68
4.1.2. EL MÉTODO TRADICIONAL DE EXPERIMENTACIÓN	71
4.1.3. LOS INCONVENIENTES DEL MÉTODO TRADICIONAL.....	73
4.1.4. PROCEDIMIENTO DE LA APLICACIÓN DEL DEE.....	74
4.2. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	80
4.2.1. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA	80
4.2.2. SUPERFICIES DE RESPUESTA POLINÓMICAS. MODELOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN	81
4.2.3. UTILIZACIÓN DE VARIABLES CODIFICADAS	82
4.2.4. MODELOS DE PRIMER ORDEN.....	83
4.2.5. MODELOS DE SEGUNDO ORDEN	84
4.2.6. NATURALEZA SECUENCIAL DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA	85
4.2.7. MÉTODO DE MÁXIMA PENDIENTE EN ASCENSO	86
4.3. DISEÑOS DE SUPERFICIES DE RESPUESTA.....	87
4.3.1. DISEÑOS DE PRIMER ORDEN.....	88
4.3.2. DISEÑOS FACTORIALES 2^k	89
4.3.3. FRACCIONES DE DISEÑOS FACTORIALES 2^k	89
4.3.4. DISEÑOS DE SEGUNDO ORDEN	90
4.3.5. DISEÑOS FACTORIALES 3^k	90
4.3.6. DISEÑOS COMPUESTOS CENTRALES	91
4.4. ALGUNAS CONSIDERACIONES FINALES.....	93
4.4.1. BLOQUES.....	93
4.4.2. EXPERIMENTOS DE MEZCLA	93
4.4.3. EVOP.....	94



4.5.	EXPERIMENTOS CON MEZCLA	95
4.5.1.	LOS NIVELES DE LOS FACTORES SON LAS PROPORCIONES DE LOS INGREDIENTES.....	95
4.5.2.	DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO DE LOS FACTORES CON UN SISTEMA DE COORDENADAS SÍMPLEX	96
4.6.	DISEÑO DE TRATAMIENTOS PARA MEZCLAS	97
4.6.1.	DISEÑOS DE RETÍCULA SÍMPLEX	97
4.6.2.	DISEÑOS SÍMPLEX CON CENTROIDES	98
4.6.3.	DISEÑO SÍMPLEX CON CENTROIDES AMPLIADO	98
4.6.4.	PSEUDOCOMPONENTES PARA INGREDIENTES CON COTAS INFERIORES	100
4.7.	ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS CON MEZCLA	101
4.7.1.	POLINOMIOS CANÓNICOS PARA APROXIMAR SUPERFICIES	101
4.7.2.	ESTIMACIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA POLINOMIAL CANÓNICO CUADRÁTICO.....	103
5.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	105
5.1.	MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO.....	105
5.1.1.	PROBETA	105
5.1.2.	BÁSCULA DE PRECISIÓN.....	106
5.1.3.	COMPACTADORA AUTOMÁTICA DE MORTEROS C0100 ..	106
5.1.4.	CAPAZOS	107
5.1.5.	REGLE	108
5.1.6.	BANDEJA METALICA	108
5.1.7.	TAMIZ	108
5.2.	METODO ENSAYO	109
6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	113
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	113
6.2.	MÉTODO DE ENSAYO	114
6.3.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	114
6.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	115



6.5. RESULTADOS	117
6.6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	118
7. OPTIMIZACIÓN	134
8. CONCLUSIONES	137
9. TRABAJOS FUTUROS	141
10.ANEJOS	145
10.1. ANEJO I	145
10.1.1. EVOLUCION DEL METODO DE ENSAYO	145
10.1.2. PRACTICAS EN LABORATORIO	145
10.1.2.1. 1º ENSAYO (16/JUNIO/2011)	145
10.1.2.2. 2º ENSAYO (21/JUNIO/2011)	147
10.1.2.3. 3º ENSAYO (27/JUNIO/2011)	149
10.1.2.4. 4º ENSAYO (30/JUNIO/2011)	150
10.1.2.5. 5º ENSAYO (05/JULIO/2011).....	152
10.1.2.6. 6º ENSAYO (15/JULIO/2011).....	153
10.1.2.7. 7º ENSAYO (18/JULIO/2011).....	154
10.2. ANEJO II TERMINOLOGIA DE ARIDOS	156
10.2.1. GRANULOMETRIA.....	156
10.2.2. MODULO GRANULOMETRICO	156
10.2.3. AJUSTES GRANULOMÉTRICOS	157
10.2.4. GRANULOMETRIAS ÓPTIMAS	158
10.2.5. DOMINIOS GRANULOMETRICOS.....	159
10.2.6. ARIDO FINO Y ARIDO GRUESO	160
10.2.7. DENSIDAD	162
10.2.8. DENSIDAD APARENTE.....	162
10.2.9. ESQUELETO GRANULAR	163
10.3. ANEJO III TERMINOLOGIA DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS	163
10.3.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	163
10.3.2. FACTORES.....	164
10.3.3. NIVELES DE UN FACTOR	164



10.3.4. TRATAMIENTOS	164
10.3.5. ESTRUCTURA DE TRATAMIENTOS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL	164
10.3.6. UNIDAD EXPERIMENTAL	165
10.3.7. VARIABLE DE RESPUESTA	165
10.3.8. EFECTO PRINCIPAL	165
10.3.9. INTERACCIÓN.....	165
10.3.10. VARIABLE CONCOMITANTE	165
10.3.11. BLOQUE	166
10.3.12. ERROR EXPERIMENTAL	166
10.3.13. CONFUSIÓN	166
11. BIBLIOGRAFÍA	168



INDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Etapas del proceso de tratamiento de los áridos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)	35
Figura 2: Tipos de trituradoras (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid).....	36
Figura 3: Esquema de planta de tratamiento de áridos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid).....	37
Figura 4: Esquema de una criba (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid).....	38
Figura 5: Distribución de las aplicaciones de los áridos	41
Figura 6: Aplicación de los áridos en la construcción.....	41
Figura 7: Evolución del consumo de áridos para la construcción (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)	43
Figura 8: Consumo de áridos en Europa en el año 2004.....	44
Figura 9: Curva ideal de Füller.....	47
Figura 10: Método de Bolomey	50
Figura 11: Granulometrías continua y discontinua (Fernández Cánovas, 1991)	62



Figura 12: Representación de un sistema en estudio en DDE: factores (x), respuestas (y)	70
Figura 13: Esquema del método tradicional	72
Figura 14: Experimentación variando un factor cada vez	72
Figura 15: Limitaciones de la experimentación variando un factor cada vez	73
Figura 16: Dominio experimental como combinación de los dominios particulares de cada factor	76
Figura 17: Espacio de un sistema símplex	96
Figura 18: Ejes de las variables en el sistema Símplex de 3 variables	97
Figura 19: Diseño Símplex con Centroide ampliado para un experimento de mezcla con 3 componentes	99
Figura 20: Probeta	105
Figura 21: Peso	106
Figura 22: Compactadora automática de morteros	107
Figura 23: Capazo.....	107
Figura 24: Regle	108
Figura 25: Tamices (Fuente: todoedificacion.blogspot.com)....	109



Figura 26: Relación peso - % árido 0-4.....	118
Figura 27: Ejemplo método de ajuste inadecuado.	119
Figura 28: Gráfica de diseño simplex en cantidades.....	122
Figura 29: Gráfica de probabilidad normal.....	125
Figura 30: Gráfica de residuos vs ajustes.....	126
Figura 31: Histograma.....	126
Figura 32: Residuos vs 0-4.....	127
Figura 33: Residuos vs 6-12.....	128
Figura 34: Residuos vs 12-20	129
Figura 35: Residuos vs orden observación.....	130
Figura 36: Gráfica de rastreo de Cox	130
Figura 37: Gráfica de contorno de mezcla para peso.....	131
Figura 38: Gráfica de superficie de mezcla de peso.	132
Figura 39: Optimización de los áridos	134
Figura 40: Curvas granulométricas.....	159
Figura 41: Dominios granulométricos	160



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de rocas.....	29
Tabla 2: Clasificación de áridos según aplicación.....	30
Tabla 3: Clasificación de los áridos por tamaño.....	31
Tabla 4: Cantidad de agua(l/m ³) según tipo de mezcla.....	46
Tabla 5: Valores de a	49
Tabla 6: Valores que deben tomar α y n_0	92
Tabla 7: Diseño simplex de k componentes	99
Tabla 8: Diseño de retícula simplex y un diseño simplex con centroides para una mezcla con tres componentes.....	100
Tabla 9: Dosificaciones de los 16 experimentos	116
Tabla 10: Resultados de los experimentos.....	117
Tabla 11: Errores del método cuadrático.....	121
Tabla 12: Errores del método cubico especial	121
Tabla 15: Módulos granulométricos de las curvas de Fuller correspondientes a diferentes tamaños máximos del árido.	157
Tabla 16: Dominios granulométricos	159
Tabla 17: Escala granulométrica	161



INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO

Con el objetivo de obtener el título de Arquitecto Técnico D. Pedro José Agustín Ortega ha realizado el proyecto final de carrera titulado "**Optimización del esqueleto granular**". Este trabajo ha sido dirigido por los profesores D. Carlos José Parra Costa y D. Eusebio José Martínez Conesa del Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El proyecto fin de carrera que se expone a continuación tiene como objetivo optimizar la máxima compacidad de los áridos para conseguir el menor volumen de huecos posible en la mezcla. Se realizaron ensayos con tres tipos de áridos de diferente granulometría, mezclados en diversas cantidades.

1.2. INTRODUCCIÓN

Los áridos son materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción y en numerosas aplicaciones industriales. Coloquialmente son conocidos como arena, grava, gravilla, etc.

Cada español consume, sin ser consciente de ello, 11.650 kg al año, es decir, aproximadamente 150 veces su peso (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid [11]). Prácticamente todo lo que una persona puede observar a su alrededor procede de una cantera o de una mina, a excepción de lo proveniente de los mundos vegetal y animal (muebles, tejidos, etc.). Los áridos son materias primas minerales indispensables para la sociedad. En general, se trata de materiales baratos y abundantes que se explotan necesariamente cerca de los centros de consumo, con el fin de reducir los costes de transporte.



Por diversas razones es conveniente que la pasta de cemento sea sostenida por un esqueleto inerte que no interfiera en el desarrollo y formación de la misma. Esta función es realizada por los áridos que constituyen aproximadamente un 70% del volumen total del hormigón y que resisten la acción de las cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática, además de reducir los cambios de volumen resultante del proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Al mismo tiempo poseen propiedades y estados que influyen en el hormigón desde su proceso de amasado hasta en la resistencia cuando esta endurecido.

En este proyecto, nos proponemos a optimizar la máxima compacidad de los áridos para conseguir el menor volumen de huecos posible en la mezcla. Para conseguir tal objetivo hemos realizado diversos ensayos con áridos de diversas granulometrías mezclados en diferentes porcentajes.

Para la optimización de la compacidad de los áridos se pueden emplear diversos métodos analíticos y, en particular, el método de superficie de respuesta (MSR) aplicándolo en esta ocasión para mezclas, que permite optimizar una función de respuesta sujeta a diferentes variables dependientes.

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

En definitiva, el objetivo de este proyecto es que mediante la metodología de la superficie de respuesta (MSR) obtener el modelo a utilizar para la mayor compacidad de los áridos. El



modelo obtenido será objeto de análisis para concluir cuales serán las variables y obtener una máxima compacidad del árido posible.

1.3. RESUMEN POR CAPÍTULOS

Dentro de este proyecto fin de carrera se puede ver una investigación de como optimizar el esqueleto granular de una mezcla de tres tipos de áridos de diferentes granulometrías.

En el capítulo 2 se realiza una exposición de la base teórica utilizada sobre la que se sustenta esta investigación, conocida como "Estado del Arte".

A continuación, en el Capítulo 3 se hace una pequeña introducción sobre los áridos y una breve descripción del método de obtención en la cantera, posteriores aplicaciones de los áridos y métodos de dosificación, para mostrar el alcance del documento.

En el Capítulo 4, entrando en materia, se explica que es el método de superficie de respuesta y el diseño estadístico de experimentos de forma pormenorizada. Método de análisis de los resultados obtenidos en la investigación.

En el Capítulo 5, se realiza la campaña experimental, describiendo brevemente los materiales a utilizar, y de forma detallada el método de ensayo utilizado durante los experimentos.

En el Capítulo 6, se han analizado y discutido los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Tras analizar los resultados se ha proseguido en el Capítulo 7 con la realización de la optimización de la mezcla, según el método utilizado.

Por último, se exponen las conclusiones de este proyecto fin de Carrera en el Capítulo 8, deducidas de los Capítulos 7 y 8. Y en el Capítulo 9 se explican los posibles trabajos futuros que se pueden realizar a posteriori de esta investigación, con el afán de mejorar lo existente, e ir más allá.



Y para finalizar, un Capítulo 10 (Anejos) que incluye la evolución hasta llegar al método de ensayo finalmente utilizado, y terminología básica para la comprensión de esta investigación.



ESTADO DEL ARTE



2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

El problema de construir modelos empíricos y de buscar en ellos sus valores extremos fue presentado formalmente a partir de los trabajos de Hotelling [26] y de Friedman y Savage [23], para ser formulado elegantemente en artículos como Box y Wilson [5], en primer lugar, luego más desarrollados en Box y Hunter [9], Bradley [10], Hunter [28], entre otros. A partir de estos desarrollos, que dieron en llamarse Metodología de Superficie de Respuesta, ha sido posible estudiar modelos empíricos que representen sistemas complejos desde un punto de vista estadístico integral y eficiente. En el trabajo de Box y Wilson [5], los autores describen una metodología según la cual, a partir de la experimentación secuencial, es posible modelar determinado tipo de variables que se deseen controlar dentro de un sistema, a partir de la intervención del experimentador sobre sus niveles de los que tiene control. En particular el trabajo describe aquella metodología de diseño y de análisis cuando las variables a controlar tienen distribución normal de probabilidad.

Los detalles, aplicaciones y alcances de este enfoque fueron recibidos con éxito dentro del ámbito de la estadística experimental. El mismo fue recibiendo numerosas y valiosas aportaciones en los años sucesivos, tanto a nivel metodológico como de formas de realizar los cálculos. Actualmente, los resultados más autorizados y aceptados sobre la Metodología de Superficie de Respuesta se han publicado en referencias bibliográficas dedicadas al tema. Entre las más representativas, encontramos a: Box y Hunter [9], Cornell [13], Myers y Montgomery [40], entre otros. En varios artículos muy interesantes también se describe en mayor grado el avance histórico del conocimiento en este campo específico, entre tantos otros, encontramos: Mead y Pike [49], Myers et al. [42] y Box [8].



Entre estos, uno de los más recientes en donde se hace una extensiva revisión bibliográfica muy completa es el Myers et al. [42]. Todas estas aportaciones han centrado su estudio suponiendo que la distribución de la variable que se desea controlar es del tipo normal. Cuando los supuestos de normalidad dejan de tener validez, hay ciertos puntos de aquella metodología que dejan de tener validez tal como fueron planteados. En lo que refiere al desarrollo de los diseños de experimentos para variables con distribución no normal, la formulación actual del problema parte de una serie de artículos y trabajos, entre los cuales podemos citar a: Myers et al. [39], Bisgaard y Steingberg [3] entre otros. Los trabajos que han intentado abordar el tema del diseño y análisis de experimentos para modelos normales no lineales parten del trabajo de Box y Wilson [5], para encontrar muy pocas referencias en la actualidad que le hayan dado continuidad, como lo son Myers [41]; Lewis et al. [33] y Myers et al. [38]. En particular cuando el enfoque se extiende a la Metodología de Superficie de Respuesta son muy escasos los trabajos que han abordado el tema. Ente ellos, hemos encontrado Myers y Montgomery [40].

Box y Wilson [5] aceleraron la promoción del análisis de superficie de respuesta en aplicaciones industriales, su tema principal fue el uso de la experimentación secuencial con el propósito de determinar las condiciones operativas óptimas para un proceso industrial. El enfoque general comienza con diseños de tratamiento factoriales de 2^n para identificar los factores que influyen en el proceso, experimentos subsecuentes usan las combinaciones de tratamientos para localizar una área en el espacio del factor que tenga oportunidad de producir respuestas óptimas, y por último, en esta región se añade un arreglo factorial de 2^n con combinaciones de tratamientos, para determinar la superficie de respuesta con polinomios cuadráticos. Box y Draper [7] y Myers y Montgomery [40] realizaron un estudio de los métodos para identificar factores significativos y niveles de los factores en la región de condiciones de respuesta óptima. Los factoriales 2^n son diseños adecuados para estimar las respuestas medias para el modelo lineal, o de primer orden. La inclusión de dos o más observaciones en el medio de todos los



factores suele ser el procedimiento recomendado para estimar el error experimental y proporcionar un mecanismo para evaluar si el modelo lineal de superficie de respuesta es apropiado. Box y Hunter [9] mostraron que el número de puntos centrales en los diseños centrales compuestos rotatorios puede elegirse de forma que proporcione un diseño con precisión uniforme para la superficie estimada de una unidad alrededor de las coordenadas del centro del diseño en la escala codificada. Su razonamiento fue que el investigador está más interesado en la superficie de respuesta cerca del centro del diseño cuando un punto estacionario de la superficie se localiza cerca del centro, el punto estacionario es un punto de respuesta máxima, mínima o con forma de silla.

También, presentan las condiciones para colocar en bloques los diseños de superficie de respuesta de segundo orden, de manera que los efectos de los bloques no afectan las estimaciones de los parámetros para la ecuación de la superficie de respuesta.

Box y Behnken [6] propusieron una clase de diseños de tres niveles para estimar las superficies de respuesta de segundo orden. Los diseños son rotatorios, o casi rotatorios, con menor número de unidades experimentales en comparación con los diseños $3n$, se forman con la combinación de los diseños $2n$ y diseños de bloques incompletos.

Myers et. al [39] usaron la predicción de la varianza de la ecuación de la superficie de respuesta de segundo orden para evaluar muchos de los diseños conocidos de esta superficie, considerando que un diseño era superior si la varianza de los valores pronosticados era menor que la de los otros diseños.

Myers y Montgomery [40] presentaron las eficiencias de los diseños para estimar los coeficientes del modelo y para predecir las varianzas en una región esférica. Sus conclusiones generales fueron que los diseños central compuesto y de Box-Behnken eran bastante eficientes lo mismo que algunos diseños saturados de Roquemore [50], Suresh [58] planteó una metodología de superficie de respuesta, con un modelo matemático de segundo



orden en términos de parámetros de mecanizado. Este modelo proporciona el factor de efectos independientes de los parámetros del proceso que posteriormente se optimiza con algoritmos genéticos para predecir la rugosidad.

La metodología es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas en la que se usan como variables la velocidad de corte, avance, profundidad y radio de la herramienta. Según Figueroa, la metodología de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas utilizadas en el estudio de la relación entre una o más respuestas y un conjunto de factores o variables independientes y donde el objetivo es optimizar éstas respuestas. Dicha metodología se realiza mediante una experimentación secuencial, esto es, la aproximación a la región de interés se realiza de forma iterativa utilizando diseños cada vez más complejos que dependen de la información que se obtiene en cada etapa. En la actualidad hay varios paquetes estadísticos para analizar superficies de respuesta, algunos de estos específicamente diseñados para ello.

Actualmente, los resultados más autorizados y aceptados sobre la Metodología de Superficie de Respuesta se han publicado en referencias bibliográficas dedicadas al tema. Entre las más representativas, encontramos a: Myers [41], Box [8] , Cornell [12], Myers et al. [38] entre otros.

Entre estos, uno de los más recientes en donde se hace una extensiva revisión bibliográfica muy completa es el Myers et al [39]. Todas estas aportaciones han centrado su estudio suponiendo que la distribución de la variable que se desea controlar es del tipo normal. Cuando los supuestos de normalidad dejan de tener validez, hay ciertos puntos de aquella metodología que dejan de tener validez tal como fueron planteados. En lo que refiere al desarrollo de los diseños de experimentos para variables con distribución no normal, la formulación actual del problema parte de una serie de artículos y trabajos, entre los cuales podemos citar a: Bisgaard y Fuller [2], Myers et al. [42], entre otros. Los trabajos que han intentado abordar el tema del diseño y análisis de experimentos para modelos normales no lineales



parten del trabajo de Box y Wilson [5], para encontrar muy pocas referencias en la actualidad que le hayan dado continuidad, como lo son Myers [41]; Lewis et al.[33] y Myers et al.[42]. En particular cuando el enfoque se extiende a la Metodología de Superficie de Respuesta son muy escasos los trabajos que han abordado el tema. Ente ellos, hemos encontrado Myers y Montgomery [40].

2.2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA COMPACIDAD DEL ARIDO

La compactación de las partículas de diferentes tamaños y formas es un fenómeno interesante tanto desde el punto de vista científico como también des técnico en la práctica. Este asunto no solo es relevante para el hormigón, sino también para muchos otros materiales de construcción en los que un aglomerante liga las partículas. La compactación de las partículas adquiere una función clave en la fabricación de productos cerámicos, piezas de metal duro para herramientas de corte y perforadoras de roca, suspensiones de partículas con grandes porcentajes de sólidos, alimentos, incluidos el chocolate con leche, pastillas de medicamentos, polvos de carbón y metal en cuanto a su fluidez y también en la producción de asfalto. Entonces los costes del producto final se pueden reducir siempre que el volumen de un componente muy costoso se pueda reducir a la compacidad máxima posible. Esto solo es posible con la condición de que otras propiedades, como por ejemplo la trabajabilidad y la resistencia a compresión, no se vean perjudicadas.

Las iniciativas primeras realizadas para modelar la compacidad estaban diseñadas de forma demasiado sencilla. A comienzos de los años 30 del pasado siglo. Furnas [21] fue uno de los primeros científicos que publicó un estudio matemático sobre la



compactación de los sólidos triturados y creó modelos para sistemas binarios y terciarios.

En 1961 McGeary [34] describió la compactación de las mezclas binarias de partículas de acero redondas aplicando aire y un vibrado moderado del recipiente de ensayo.

Farris [17] publicó artículos sobre la viscosidad de las suspensiones de partículas con diferentes tamaños.

Recientemente Golterman et al. [24] determinaron la compacidad de diversas combinaciones de áridos para hormigón por medio de la compactación de las mezclas en una mesa de vibrado.

En la Actualidad investigadores como Simon et al. [52] se han dedicado a la investigación del empaquetamiento de los áridos para cementos, para mejorar así su resistencia. Otros investigadores como Sobolev y Amirjanov [54] se han basado en modelos de empaquetamiento para así obtener la máxima compacidad. Pero no ha sido la única rama de investigación, ya que existen diversos métodos, como los utilizados por, Sobolev y Amirjanov [53] al investigar utilizando algoritmos genéticos, o Ding et al. [29] utilizando el método de vértices extremos, perteneciente al método de superficie de respuestas para reducir la complejidad en la proporción de mezclas combinando minerales diversos. Menéndez et al. [35] han pretendido brindar las pautas necesarias para el diseño experimental y la optimización de una mezcla de tres componentes, presentando diferentes metodologías que luego permitan ajustar y analizar superficies de respuesta.



LOS ÁRIDOS



3. LOS ARIDOS

Los áridos son productos granulares, en general. De naturaleza pétreo que puede definirse como: "Adiciones inertes que se contribuyen a la estabilidad de volumen, resistencia y economía de los hormigones" según Fernando Cassinello [19]. Su importancia es fácil de concebir, ya que el 80% de hormigón está definido por ellos

Los áridos pueden ser materiales granulares naturales rodados o procedentes de machaqueo, o bien artificiales que reúnan, las características de resistencia y durabilidad exigidas al hormigón o al mortero.

Muchas de las propiedades de los áridos dependen de las rocas de las que proceden, como ocurre con su composición química, estructura petrográfica, resistencia, dureza, densidad, compacidad, color, etc. Otras por el contrario serán consecuencia de del proceso de formación del árido como ocurre con su tamaño, forma, textura superficial, absorción, etc. Todas estas propiedades van a tener una influencia muy marcada en las características del hormigón, tanto fresco como endurecido, en el que entren a formar parte.

Los áridos empleados en los morteros y hormigones no deben ser activos frente a los componentes del cemento, o frente a los agentes externos. Además los áridos empleados no deben dar lugar a hormigones débiles, ni usarse áridos procedentes de calizas blandas, feldespatos, yesos o rocas excesivamente porosas.

3.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

En función de la aplicación a la que están destinados, los áridos deben reunir características diferentes, asociadas a su naturaleza petrográfica o al proceso empleado para su producción, entre las que cabe destacar:



- *Propiedades geométricas*: tamaño, forma de las partículas, caras de fractura, calidad de los finos, etc.
- *Propiedades mecánicas y físicas*: resistencia al desgaste, resistencia a la fragmentación, resistencia al pulimento, densidad, porosidad, contenido en agua, etc.
- *Propiedades térmicas y de alteración*: resistencia a los ciclos de hielo y deshielo, etc.
- *Propiedades químicas*: contenido en azufre, cloruros, materia orgánica, contaminantes ligeros, reactividad potencial, etc.

Estas propiedades son evaluadas gracias a un conjunto de más de 50 normas de ensayo y de especificaciones comunes a todos los países de la Unión Europea. Las plantas de áridos cuentan con sistemas tecnológicos muy avanzados que permiten controlar la calidad de los productos.

La idoneidad del control de producción que desarrollan las empresas es verificada periódicamente por organismos notificados independientes, emitiendo un certificado acreditativo. Gracias al control del proceso, se dispone de productos de calidad contrastados, tras el sometimiento continuo de los áridos a ensayos de laboratorio, que permiten determinar si sus propiedades cumplen con los requisitos de las aplicaciones en los que se van a emplear, lo que implica que los procesos de fabricación estén perfectamente controlados en sus diferentes etapas.

Desde el 1 de junio de 2004, los áridos deben llevar obligatoriamente el marcado CE tanto para su comercialización como para su uso.

Los áridos, para las aplicaciones como el hormigón o las carreteras, están regidos por reglamentos técnicos oficiales conocidos como EHE (instrucción para hormigón estructural) y el PG-3 (carreteras).

3.2. CLASIFICACIÓN

Los áridos pueden clasificarse por el tipo de roca del que proceden, por la aplicación a la que están destinados y por su tamaño.

3.2.1. POR TIPO DE ROCA

En función del tipo de roca, los áridos pueden clasificarse en las categorías indicadas en la tabla 1.

Tabla 1: Tipos de rocas

ARIDOS NATURALES			RECICLADO	SECUNDARIOS
Procedentes de la corteza terrestre. Suponen el 99 % del consumo.			Procedentes del tratamiento de residuos de construcción y demolición.	Procedentes de escorias de otras industrias generadas en procesos térmicos.
ROCAS IGNEAS	SEDIMENTARIAS	METAMORFICAS		
Plutónicas Granitos Dioritas Gabros	Calcáreas Calizas Dolomías	Gneises Cuarzitas Mármoles	Actualmente representan menos del 1 %.	Actualmente su uso es escaso.
Hipoabisales Diabasas Pórfidos	Arenosas Arenas Arenas silíceas Gravas		Hormigones Ladrillos Tejas	Escorias de horno alto
Volcánicas Basaltos Riolitas Traquitas Andesitas	Conglomerados Areniscas Grauvas		Carreteras Mezclas	Escorias de acería Otras escorias



Los áridos naturales pueden obtenerse:

- De yacimientos detríticos no consolidados, tipo arenas y gravas, en explotaciones denominadas graveras.
- Mediante la trituración de rocas masivas y consolidadas tipo granito, diorita, calizas, cuarcitas, en explotaciones denominadas canteras.

Los áridos pueden presentar formas redondeadas, cuando se trata de materiales aluviales que no son sometidos a trituración, o angulosas en el resto de los casos donde existe trituración.

3.2.2. POR TIPO DE APLICACIÓN

En función de su aplicación, los áridos pueden clasificarse en las categorías indicadas en la tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de áridos según aplicación

CONSTRUCCIÓN

Áridos para hormigón

Áridos para morteros

Áridos para capas de rodadura (carreteras)

Áridos para bases y subbases (carreteras)

Áridos para balasto de ferrocarril

Áridos para escolleras (puertos, diques, presas)

Áridos ligeros

INDUSTRIA

Áridos industriales

3.2.3. *POR TAMAÑOS*

En cuanto al tamaño, los áridos se designan mediante la fracción granulométrica d/D comprendida entre el tamaño inferior (d) y el tamaño superior (D), como se indica en la tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de los áridos por tamaño.

ESCALA GRANULOMETRICA ARIDOS	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002 – 0,06 mm
Arenas	0,06 – 2 mm
Gravas	2 -60 mm
Cantos rodados	60 – 250 mm
Bloques	> 250 mm

3.3. EL RECORRIDO DE LOS ÁRIDOS

3.3.1. *ORIGEN Y DESARROLLO*

Desde la Antigüedad, los áridos han acompañado el desarrollo de la civilización humana. En efecto, desde el inicio de los tiempos, el hombre ha utilizado materiales naturales para la construcción de su hábitat y la ordenación de su entorno.



En el periodo que comprende desde la Antigüedad hasta la Revolución Industrial del siglo XIX, la producción de áridos se realizaba artesanalmente recurriendo a medios manuales, rompiendo y triturando las rocas con herramientas rudimentarias como mazas, martillos, etc. Para evitar su transporte, los áridos se producían en las proximidades del lugar donde iban a utilizarse. En esa época, una persona podía llegar a producir 125 t al año.

El final del siglo XIX supuso una revolución en el arte de la construcción, gracias a la aparición del cemento industrial y del hormigón. En esa misma época, la creación de las redes de ferrocarril, de la infraestructura de carreteras y de las obras públicas necesarias para franquear obstáculos, requirió el uso de grandes cantidades de materiales nuevos y económicos.

Comienza entonces el verdadero auge de los áridos como sector productivo, dependiente en gran medida de la actividad constructora.

A lo largo del siglo XX, fueron desarrollándose nuevas tecnologías que permitieron incrementar las producciones mediante la incorporación al proceso de maquinaria fija y móvil, cada vez con mayor capacidad. De este modo, ha ido creciendo el tamaño de las explotaciones de áridos a cielo abierto, denominadas canteras y graveras. Hoy en día, una explotación moderna puede llegar a producir más de un millón de toneladas al año con, aproximadamente, una docena de trabajadores.

3.3.2. EVOLUCIÓN

A principios del siglo XXI, la industria extractiva de los áridos destaca como uno de los sectores mineros más importantes, a la hora de proveer a la sociedad de recursos naturales primordiales para el desarrollo económico. La profesionalización creciente es una de las metas de las empresas pertenecientes a este sector, que aplican, cada vez más, tecnologías innovadoras para optimizar y controlar los procesos. En la actualidad, la producción



de áridos se realiza en el marco de un desarrollo sostenible, procurando obtener productos de calidad con la consideración del medio ambiente y la prevención de riesgos laborales.

3.4. LA OBTENCIÓN DE LOS ÁRIDOS

La explotación de los áridos se realiza habitualmente a cielo abierto en canteras o en graveras. La concepción y el diseño de las explotaciones, así como la técnica operativa empleada, varían cuando se trata de extraer rocas masivas o materiales sin consolidar, en vía seca o en vía húmeda.

3.4.1. INVESTIGACIÓN

La investigación minera permite determinar la existencia o no de un yacimiento de áridos y, en caso afirmativo, si sus características lo hacen viable (ubicación, dimensiones, tipo de roca, calidad, etc.), ponerlo en explotación. En principio, puede decirse que las reservas de áridos son prácticamente ilimitadas en España. Pero, en numerosos casos, la inaccesibilidad del yacimiento, que éste se encuentre situado en zonas urbanas, en espacios clasificados o en espacios protegidos, así como el excesivo coste de explotación y de transporte o los posibles impactos sobre el medio ambiente, puede hacer inviable la explotación.

3.4.2. EXTRACCIÓN

La etapa de extracción se desarrolla en dos fases principales que se realizan de forma consecutiva: la descubierta de las capas explotables y la extracción de la materia prima.

- *Descubierta de las capas explotables.* Antes de comenzar la extracción propiamente dicha, es necesario poner al descubierto el yacimiento explotable, retirando selectivamente la cubierta vegetal, los estériles y las rocas alteradas. Estos materiales no aptos como áridos son, sin

embargo, de un gran valor para la restauración de las áreas ya explotadas.

- *Extracción de los materiales.* Para la extracción de áridos se emplean distintos métodos de arranque de la roca, adaptados a los diferentes tipos de yacimientos denominados graveras o canteras. La zona donde se obtiene la roca se denomina frente de extracción. Cuando la potencia del yacimiento, es decir el espesor del material, es grande, se forman bancos o escalones de altura limitada, diseñados de tal manera que permitan un acceso fácil a los equipos de carga y de transporte.

Existen dos grandes grupos de explotaciones:

- *Graveras:* cuando los materiales no están consolidados, se emplean equipos de arranque mecánico como excavadoras, palas cargadoras, dragalinas, y tractores sobre orugas (*bulldozer*), que extraen directamente la roca.
- *En vía seca:* cuando el yacimiento se encuentra por encima del nivel del agua (capa freática o nivel del curso de agua), se emplea maquinaria minera y de obras públicas, como excavadoras, *bulldozers* y palas cargadoras, atacando el frente de material desde arriba, o bien desde el pie del mismo. • *En vía húmeda:* cuando el yacimiento se encuentra por debajo del nivel del agua, desde la orilla se utilizan dragalinas con cables y cuchara o retroexcavadoras (si la profundidad es escasa) o, desde el agua, dragas (en profundidades mayores).
- *Explotación mixta:* es una combinación de los dos métodos anteriores.

3.5. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y RECICLADO

El proceso de tratamiento de los áridos permite obtener productos terminados aptos para el consumo. Se trata de un proceso muy automatizado y tecnológicamente complejo, pues intervienen en él una gran cantidad de disciplinas. Sin embargo, en cuanto a su principio básico, puede decirse que es sencillo, ya que consiste en triturar el todo-uno procedente de la explotación para obtener tamaños menores y clasificarlos con el fin de almacenar por separado cada granulometría. En algunos casos, es necesario lavar el material para mejorar sus características. Las etapas básicas son las indicadas en la figura 1.

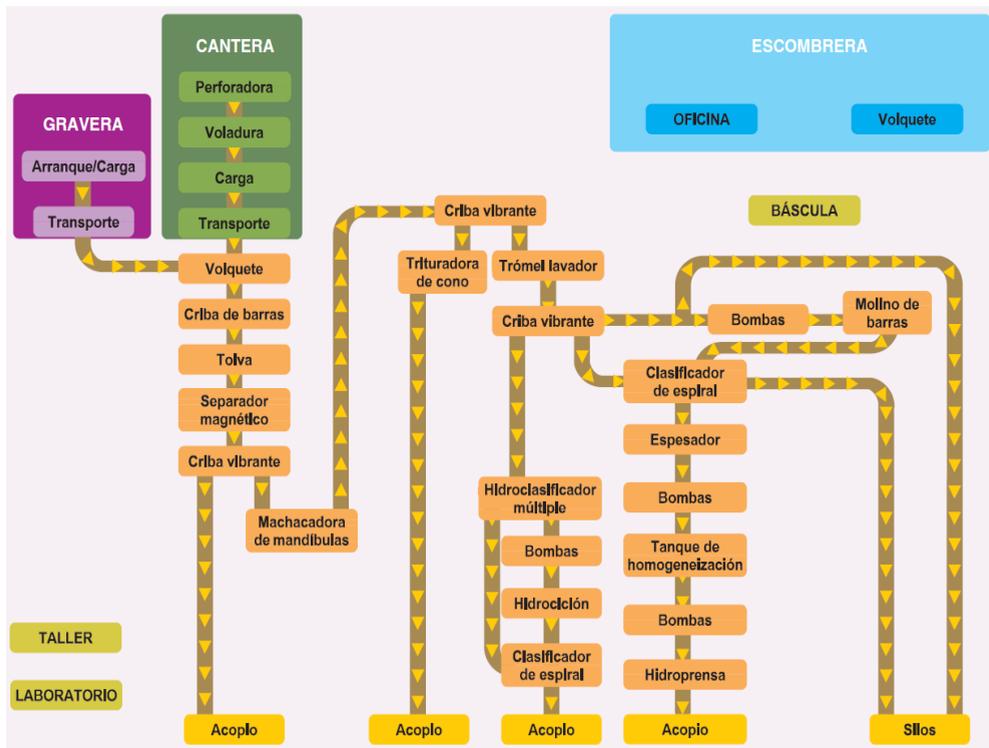


Figura 1: Etapas del proceso de tratamiento de los áridos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)

3.5.1. LA TRITURACIÓN Y LA MOLIENDA

La trituración y la molienda permiten disminuir, en sucesivas fases, el tamaño de las partículas, empleando para ello equipos de trituración de características diferentes como los de mandíbulas, los de percusión, los giratorios o los molinos de bolas o de barras, en la figura 2 se muestran diferentes tipos de trituradoras. En las arenas y gravas de origen aluvial, únicamente se trituran los tamaños superiores y, por lo tanto, el número de etapas de trituración suele ser inferior.

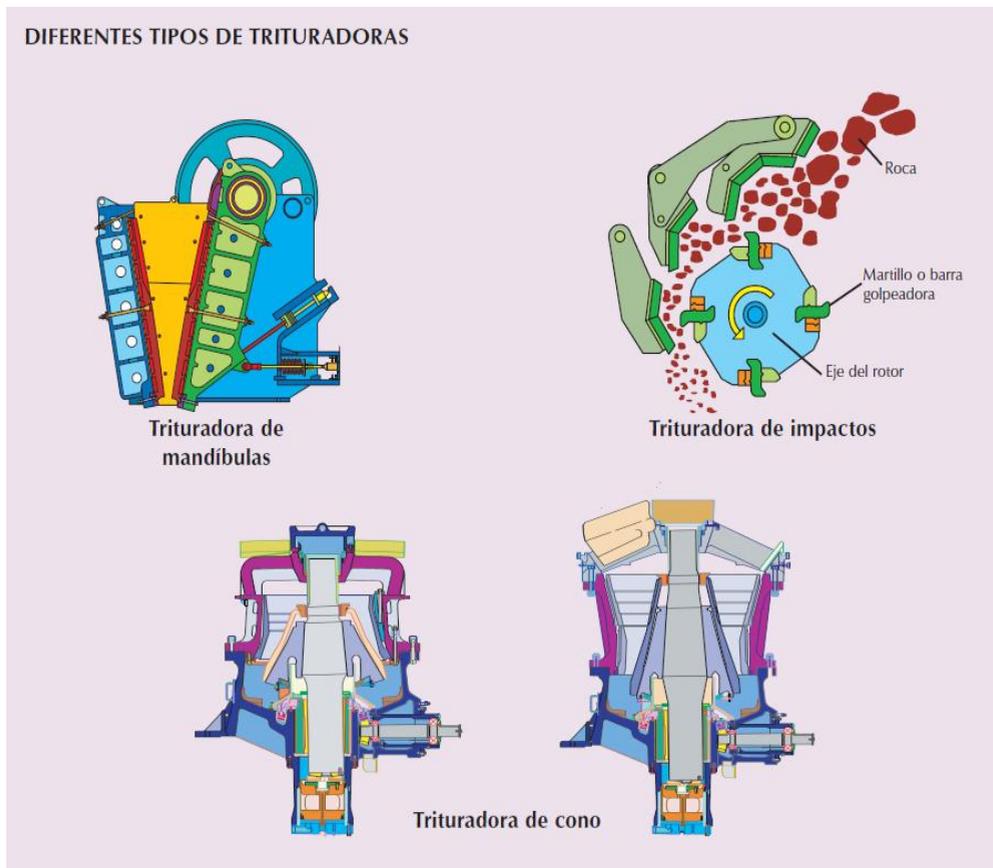


Figura 2: Tipos de trituradoras (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)

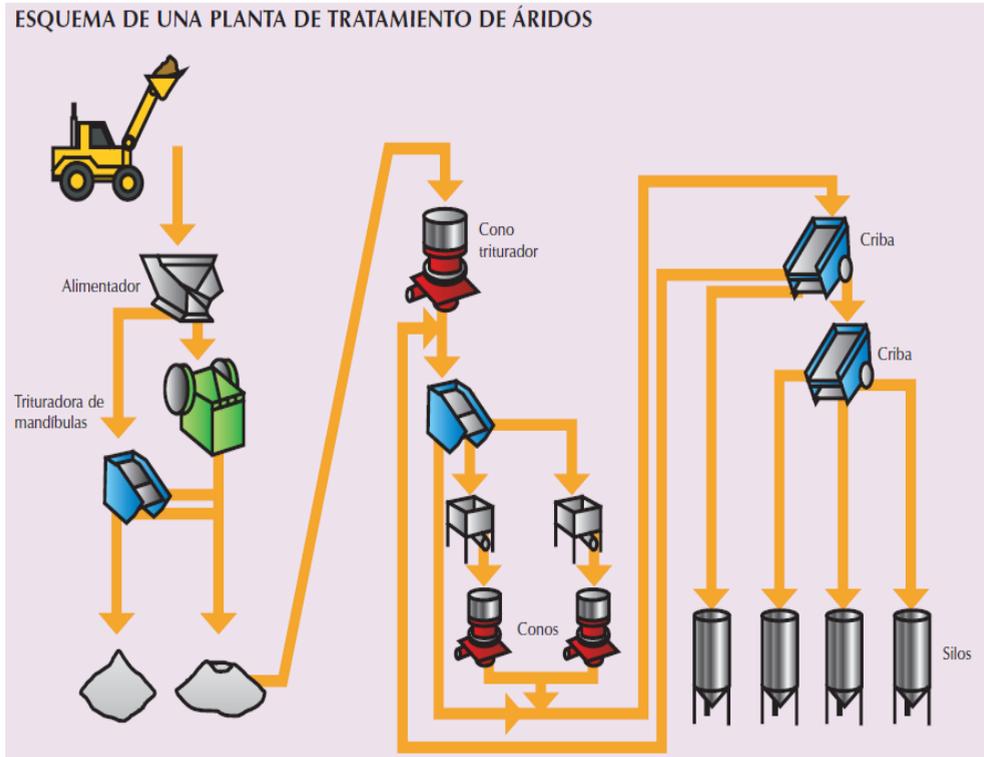


Figura 3: Esquema de planta de tratamiento de áridos (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)

3.5.2. LA CLASIFICACIÓN

Entre las etapas de trituración, aparecen intercalados los equipos de clasificación, las cribas, como se observa en la figura 3, que permiten seleccionar el tamaño de las partículas separándolas entre las que pasan y las que no pasan por las mallas. En la figura 4 se indica el funcionamiento de una criba.

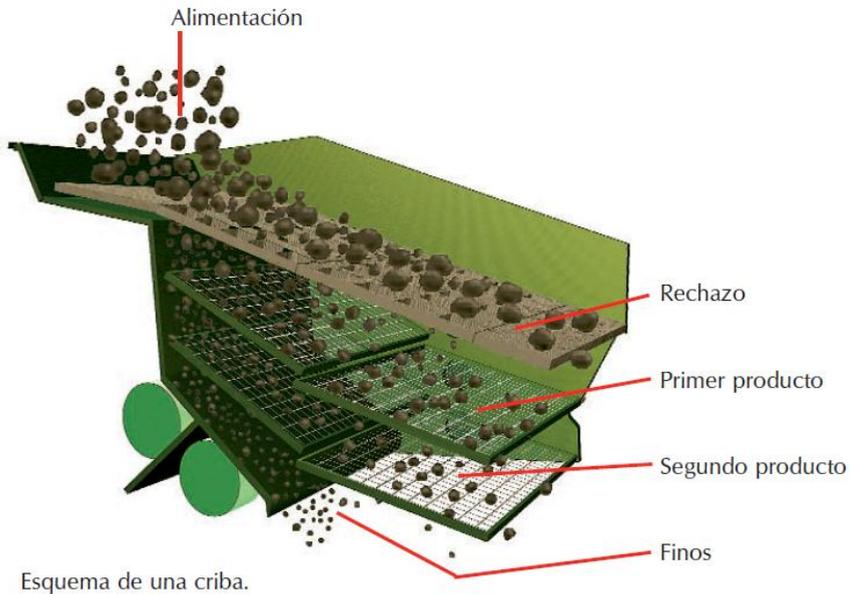


Figura 4: Esquema de una criba (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)

3.5.3. EL LAVADO

Las operaciones de desenlodado y lavado del material se realizan cuando el yacimiento presenta lodos, arcillas u otras sustancias que afecten en la calidad de los áridos, y permiten obtener áridos limpios con el fin de responder a las necesidades de determinadas aplicaciones de la industria, evitando así la alteración de la adherencia con los ligantes (cemento, cal, compuestos bituminosos u otros) permitiendo así proceder a su correcta aplicación.



3.5.4. EL ALMACENAMIENTO

En la etapa de almacenamiento, gracias al control del proceso de fabricación, ya se dispone de productos de calidad clasificados según su granulometría, que se almacenan en silos o en apilamientos a la intemperie o cubiertos, llamados acopios.

3.5.5. EL RECICLADO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

En ciertos casos, puede ser posible la realización de labores de reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) o de vaciados de obras procedentes de la construcción, de la demolición de estructuras y edificaciones o de la obra civil (túneles). De los RCD mencionados pueden obtenerse áridos reciclados aptos para ser consumidos, siempre y cuando cumplan los requisitos de calidad exigibles para cada una de las diferentes aplicaciones. Para ello, es muy importante que el residuo haya sido seleccionado en origen, de manera que se evite la mezcla de materiales no deseados, que perjudican la calidad del producto final.

3.6. APLICACIONES Y USOS DE LOS ÁRIDOS

Los áridos se emplean en cantidades considerables en todos los ámbitos de la construcción, ya sea en viviendas, obras de infraestructura, vías de comunicación, equipamientos, industria, etc. Sin embargo, esta materia prima no es nada conocida por el gran público quien, normalmente, utiliza o adquiere los bienes ya terminados donde esta materia prima ya está integrada y no en su estado natural.



3.7. PRODUCTOS Y MATERIALES

3.7.1. EL USO DE LOS ÁRIDOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Los áridos son la primera materia prima consumida por el hombre después del agua. Basta decir que cada persona consume en su vida cerca de 850.000 kg de áridos, más de 10.000 veces su peso, cantidad equivalente a la transportada en 32 camiones bañera.

Ya se trate de una autopista, aeropuerto, o vía de ferrocarril, las técnicas constructivas requieren cantidades ingentes de áridos. El balasto para las vías férreas, los cimientos de las edificaciones, las distintas capas, - ligadas o no ligadas -, que forman las carreteras, etc., son esencialmente áridos.

Las principales aplicaciones en construcción son:

- Morteros; empleados para unir ladrillos o revestir paredes. 1 m³ de mortero contiene 1,3 t de áridos.
- Hormigones; que pueden ser estructurales (cimientos, vigas y pilares) o en masa (pavimentos, etc.). Para la fabricación de 1 m³ de hormigón son necesarias entre 1,8 y 1,9 t de áridos.
- Prefabricados; como ladrillos, bloques, vigas, aceras, etc.
- Bases, subbases y aglomerados asfálticos; que son los elementos que componen las carreteras, autovías, calles, aparcamientos, pistas, etc. Para 1 km de autopista son necesarias unas 30.000 t.
- Balasto; para construcción de vías férreas, y sobre el que se apoyan las traviesas y los raíles. 1 km de vías de ferrocarril requiere unas 10.000 t de áridos.
- Piedras y bloques de escollera para puertos.

Y otras aplicaciones como: presas, puentes, aeropuertos, calles, centros comerciales, parques de ocio, viviendas, recintos feriales, edificios singulares, rascacielos, túneles, universidades, etc.

En la figura 5, se realiza un gráfico donde se observa la distribución del árido en sus aplicaciones.

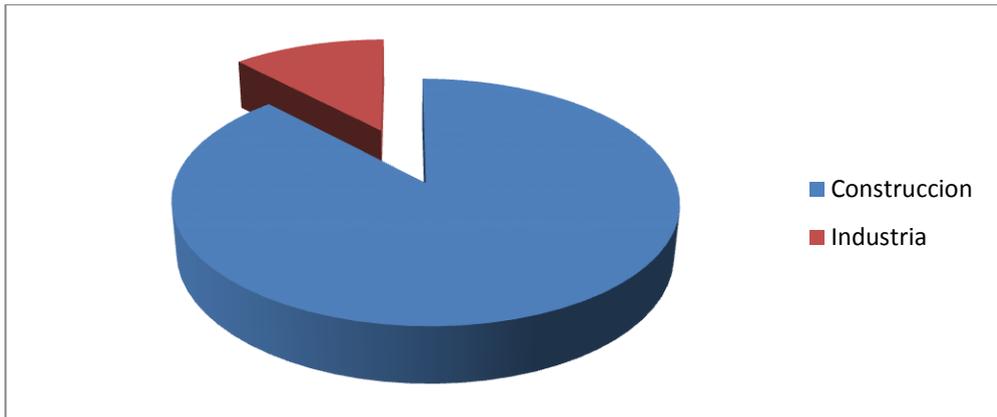


Figura 5: Distribución de las aplicaciones de los áridos

Las principales aplicaciones de los áridos se desglosan en la figura 6.

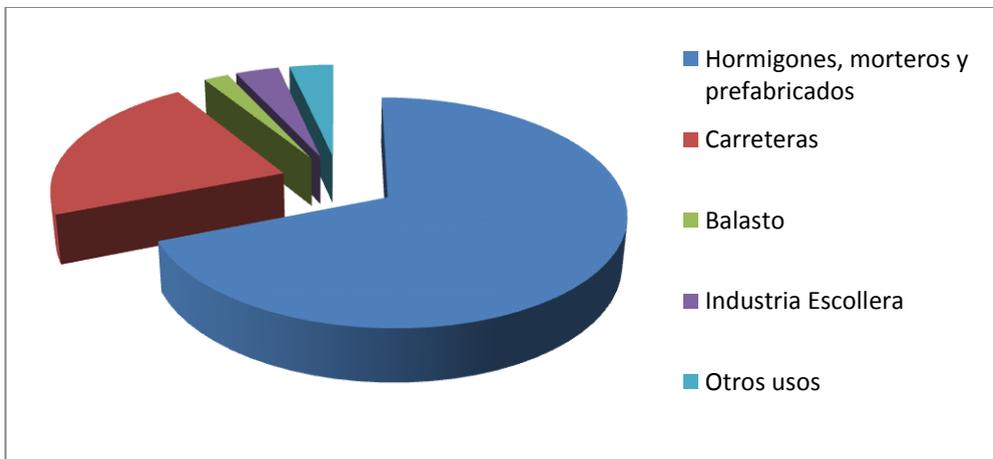


Figura 6: Aplicación de los áridos en la construcción



3.8. LOS ÁRIDOS EN ESPAÑA

La producción de áridos en España ocupa puestos muy destacados en aspectos tan importantes como:

- Toneladas producidas: 500 Mt en 2004, cifra que representa cerca del 85 % del total de los minerales producidos en España, repartidas en 438 Mt de áridos para la construcción y otros 65 Mt para aplicaciones industriales. Actualmente, nuestro país es el segundo productor europeo, por detrás de Alemania.
- Volumen de negocio: 3.350 millones de euros, en 2004.
- Explotaciones de áridos: 2.250, de las que unas 1.900 están activas, lo que supone el 55,3 % del total de explotaciones mineras españolas.
- Empleo directo: con 13.000 trabajadores directos que representan el 30,5 % del total de la minería del país, el sector de los áridos está cerca de convertirse en el primer generador de empleo minero.
- Empleo total: considerando el empleo total generado, cerca de 85.000 trabajadores, en labores relacionadas con la extracción, la producción y el transporte de los materiales hasta el mercado.

En la figura 7 se muestra la evolución de la cantidad de áridos que se ha consumido en España desde 1980 a 2005, incrementando el consumo casi en un 300%.

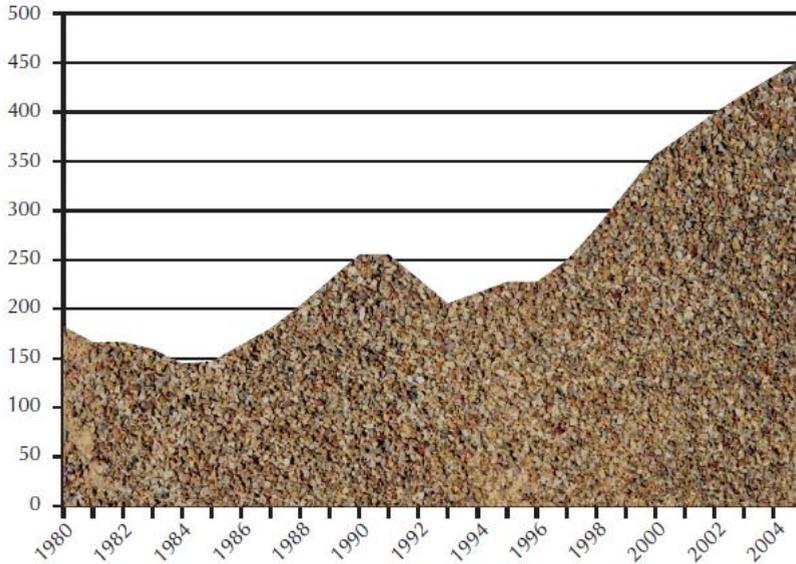


Figura 7: Evolución del consumo de áridos para la construcción (Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid)

3.9. LOS ÁRIDOS EN EL MUNDO

La industria de los áridos es la más importante dentro de la minería mundial, en cuanto a volumen producido y número de trabajadores y de explotaciones. Es la única minería con presencia en la totalidad de países, exceptuando los de menor superficie como, por ejemplo, San Marino o Mónaco.

Actualmente, el consumo mundial de áridos es imposible de evaluar a ciencia cierta, pero su tendencia es creciente por ir ligado al desarrollo económico.

Por ejemplo, en la Unión Europea, existen más de 27.000 explotaciones de áridos, que producen cerca de 2.750 Mt de áridos anuales generando 250.000 empleos.

En estos momentos, como se muestra en la figura 8, España ocupa el segundo lugar después de Alemania, que produce unas 525 Mt, por encima de Francia (402 Mt), Italia (360 Mt) y el Reino Unido (260 Mt). Otro gran productor es Estados Unidos, donde se producen anualmente unas 2.800 Mt en aproximadamente 10.000 canteras o graveras.

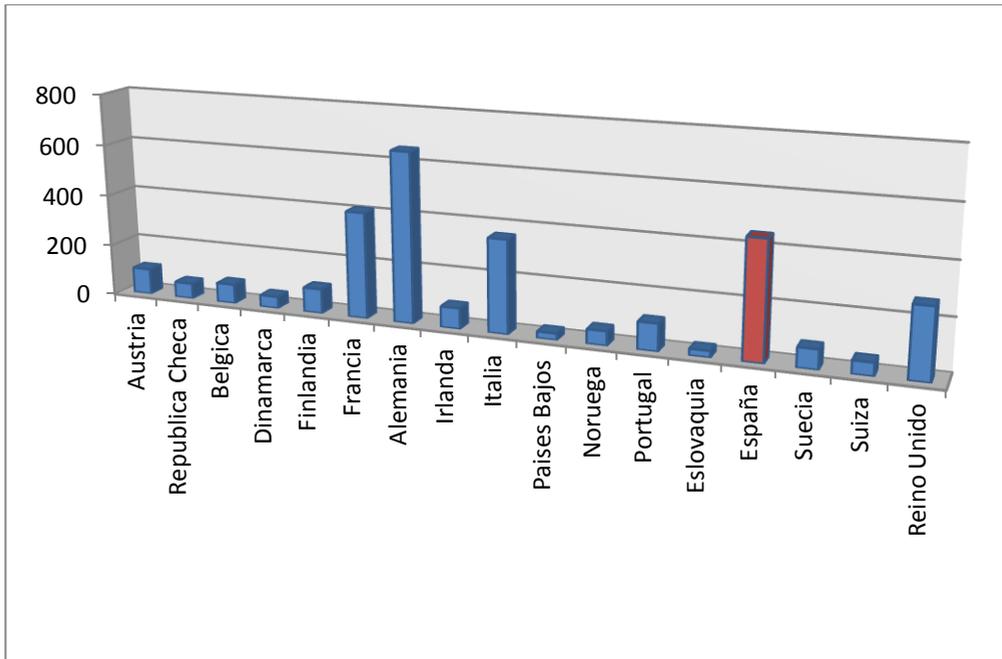


Figura 8: Consumo de áridos en Europa en el año 2004

3.10. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES

El estudio de los métodos de dosificación más significativos es un primer paso de cara a dominar el diseño de mezclas de hormigón. En este sentido, el análisis en detalle de las metodologías más representativas proporciona unas nociones esenciales en el arte de dosificar, por lo que a continuación se describen cinco procedimientos que consideramos básicos. Más tarde, se



comentan otros métodos mundialmente utilizados con el fin de dar una visión lo más amplia posible sobre el tema de la dosificación.

Generalmente, se considera que las metodologías de dosificación pueden dividirse, fundamentalmente, en dos grupos: uno formado por los métodos que tienen como dato principal de partida la dosificación de cemento y otro formado por los hormigones definidos por sus resistencias mecánicas, especialmente la de compresión.

3.10.1. MÉTODO DE FÜLLER

Es uno de los más clásicos y fáciles de aplicar cuando se conoce la cantidad de cemento que deberá tener el hormigón. Su uso está muy indicado en obras de hormigón armado, en las que el tamaño máximo del árido esté comprendido entre 50 ± 20 mm, la forma de los áridos sea redondeada y la cantidad de cemento por metro cúbico no sea inferior a 300 kg.

Los datos que se deben proporcionar son, evidentemente, la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón, la consistencia y la granulometría y densidad relativa de los áridos.

A partir de aquí, el primer objetivo es determinar el tamaño máximo del árido que se utilizara en el hormigón; a efectos de aplicación del método, se considera como tamaño máximo la abertura del menor tamiz que retiene menos del 25% al cribar por él el árido de mayor tamaño disponible, excluyéndose de esta determinación los grandes cantos de dimensiones anormales.

A continuación, mediante el uso de tablas, se puede encontrar la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón en función del tipo de árido utilizado, de su tamaño máximo y de la consistencia que deba tener el hormigón. El procedimiento consiste en consultar una tabla base donde se indica la cantidad de agua requerida cuando se emplean áridos de granulometría y características físicas medias, en mezclas con una relación

agua/cemento de 0,57 en peso, aproximadamente, y con un asiento de 76 mm en el cono de Abrams. Si varían las condiciones citadas, se debe modificar los valores que proporciona la tabla según las correcciones que se indican en una segunda tabla.

Tabla 4: Cantidad de agua(l/m³) según tipo de mezcla.

Consistencia del hormigón	Asiento del cono de Abrams (cm)	Áridos rodados			Áridos machacados		
		80 mm	40 mm	20 mm	80 mm	40 mm	20 mm
Seca	0-2	135	155	175	155	175	195
Plástica	3-5	150	170	190	170	190	210
Blanda	6-9	165	185	205	185	205	225
Fluida	10-15	180	200	220	200	220	240

Una vez se conoce las cantidades de agua y cemento que se van a utilizar, el siguiente paso es determinar la proporción en que se deben mezclar los distintos gránulos para que el árido compuesto presente la máxima compacidad. Con este fin, en el método de Fuller se utiliza una curva de referencia cuya granulometría se consideró, según su autor, 'ideal' a la hora de obtener un esqueleto granular compacto, requisito imprescindible en el intento de obtener un buen hormigón dicha curva se muestra en la figura 9.

La curva que en este método se toma como modelo para componer los áridos viene definida en la ecuación 1.

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1)$$

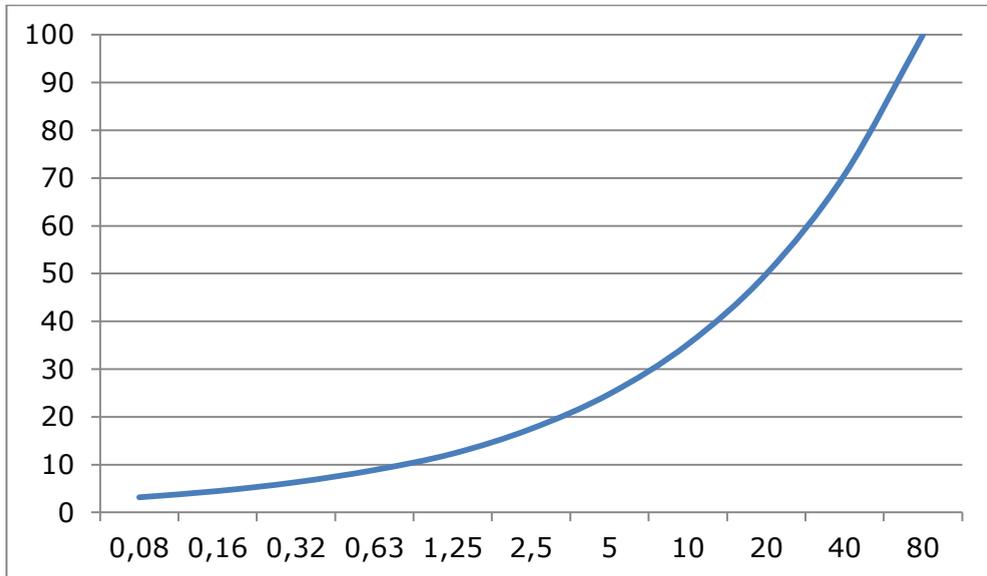


Figura 9: Curva ideal de Füller.

Donde y es el tanto por ciento en volumen elemental que pasa por cada tamiz de abertura d , el tamaño máximo del árido (en mm) es D y la abertura de cada uno de los tamices de la serie utilizada (en mm), d .

De esta manera, el objetivo es realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los distintos áridos a la curva de Füller, o parábola de Gessner; para ello, puede emplearse un sistema de tanteos o bien uno basado en los módulos granulométricos.

La primera de estas resoluciones es gráfica y, en el propósito de conseguir que el árido resultante se adapte lo más posible a la curva teórica, han de realizarse tanteos hasta que las áreas por encima y por debajo de la curva de referencia queden compensadas. Este procedimiento resulta bastante cómodo, rápido.

La resolución numérica del método de Füller es más exacta que la anterior. La idea es obtener una mezcla que tenga el mismo módulo granulométrico que la curva de referencia; para ello, en



primer lugar se calculan los módulos granulométricos de las n fracciones que componen el árido y, a continuación, los módulos granulométricos de las curvas de Füller cuyos tamaños máximos coinciden con los de las fracciones $2,3,\dots, n$.

A partir de aquí se plantea un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que serán los tantos por ciento que se deben emplear para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la curva de referencia.

Una vez obtenida la proporción en que se mezclan las distintas fracciones de los áridos, ya se puede determinar la dosificación por metro cúbico, partiendo de la base que la suma de los volúmenes relativos de los componentes será igual al volumen del hormigón obtenido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el volumen de la pasta de cemento es algo menor que la suma de los volúmenes del cemento y del agua; esta contracción del hormigón fresco es del 2,5%, por lo que resulta necesario considerar que, para obtener un metro cúbico de hormigón, es preciso mezclar 1.025 dm^3 de componentes.

Así, se resta de 1.025 dm^3 las cantidades de agua y cemento, en volumen, anteriormente halladas; el resto será el volumen relativo de los áridos, que habrá que repartir entre las distintas fracciones en la proporción determinada con anterioridad. Para pasar de volúmenes relativos a pesos tan solo se tiene que multiplicar las cantidades halladas por las densidades relativas, que son datos.

Es importante destacar que los pesos obtenidos son para áridos secos; no obstante, es frecuente que los áridos estén más o menos húmedos, por lo que habrá que hacer las oportunas correcciones.

3.10.2. MÉTODO DE BOLOMEY

Método de dosificación que puede considerarse como un perfeccionamiento del método de Füller, y que resulta muy útil en

el diseño de hormigones en masa o fuertemente armados, ya sea con áridos rodados o machacados.

Los datos para dosificar el hormigón por el método de Bolomey suelen ser los mismos que por el de Füller, la cantidad de cemento a emplear, la consistencia de la mezcla, la granulometría y densidad relativa de los áridos disponibles e imprescindible el tipo de árido.

El desarrollo del método de Bolomey es exactamente igual que el del método de Füller; Se determina el tamaño máximo de árido que disponemos para nuestro hormigón. Después elegiremos la cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón.

A continuación se determina en qué proporción mezclaremos las distintas fracciones de árido, y aquí es donde se aportan buenas modificaciones respecto al primer método expuesto. Bolomey utiliza una curva de referencia de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y forma de los áridos. Ésta viene definida por ecuación 2.

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2)$$

En la que y , d y D tienen el mismo significado que en el método de Füller, y a es un parámetro que toma distintos valores en función del tipo de árido y de la consistencia del hormigón.

Tabla 5: Valores de a

Tipo de árido	Consistencia del hormigón	Valor de a
Rodado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seco-plástica	12
	Blanca	13
	Fluida	14

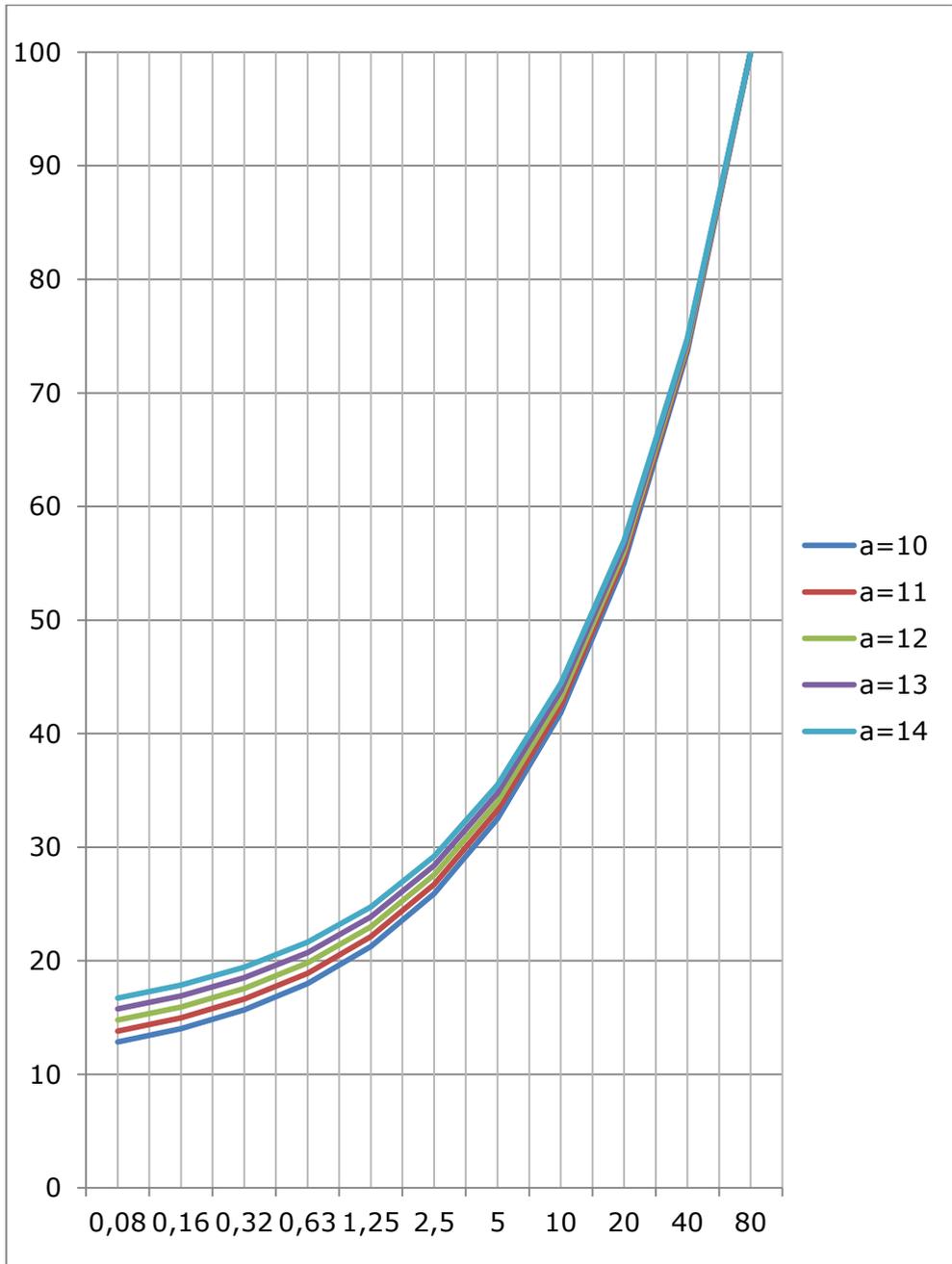


Figura 10: Método de Bolomey



De la misma manera que Füller, para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los áridos a la curva tomada como referencia puede emplearse un sistema de tanteos, o uno teórico que se basa en los módulos granulométricos.

El primero no varía respecto a Füller, pero el segundo sí aporta alguna novedad, y es que para la aplicación de este sistema el cemento se considera como un árido más.

La metodología a seguir es idéntica a la explicada en Füller, aunque debemos hacer tres observaciones: la cantidad en que debe entrar el cemento en la mezcla se conoce, por tanto, sabemos el tanto por ciento de la fracción cemento que debemos emplear. En segundo lugar, se considera que el módulo granulométrico del cemento es cero y, por último, las curvas granulométricas que utilizamos para obtener los módulos granulométricos teóricos no son realmente las curvas de Bolomey para los distintos tamaños de árido, sino una modificación de ellas.

Con todo esto, sólo nos queda determinar la dosificación de un metro cúbico de hormigón. Consideraremos que necesitamos aportar 1.025 dm^3 de componentes, valor del cual sustraeremos el volumen de agua hallado, de manera que el resto será el volumen relativo de los áridos que habrá que repartir entre el cemento y las distintas fracciones del árido en la proporción determinada anteriormente.

3.10.3. MÉTODO DE FAURY

Este método de dosificación, presentado en Francia en el año 1944, introduce una serie de mejoras muy importantes respecto a los dos anteriores, lo que lo hace bastante idóneo en la aplicación a todo tipo de hormigones, ya sea en masa o armados, y, especialmente, en los destinados a piezas prefabricadas en las que predomina la superficie del molde sobre su volumen: viguetas, vigas, dovelas...



En lo que sigue intentaremos resumir este método incidiendo en los puntos clave que éste aporta, pero no se entrará en mucho detalle ya que consideramos que este capítulo sólo debe aportar una visión general del tema; si se quiere profundizar más, tanto en este como en los otros métodos, existen muchos libros que se pueden consultar, a modo de ejemplo el de Arredondo.

Empezaremos determinando el tamaño máximo del árido, D , que en el método de Faury se considera como el diámetro de los orificios del tamiz suficiente para dejar pasar todo el árido. El valor de D puede calcularse convencionalmente por la ecuación 3:

$$D = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{y} \quad (3)$$

Definimos d_1 como el mayor de los tamices sobre el que quedan como residuo los granos más gruesos de la grava, siendo d_2 el tamiz inmediatamente inferior y la relación entre ambos $d_2 = \frac{d_1}{2}$, es decir, en progresión geométrica de razón 2. Como x designamos a la proporción de granos de dimensiones superiores a d_1 , y por y a la de granos comprendidos entre d_1 y d_2 , retenidos, por tanto, en el tamiz d_2 .

Una vez conocemos D , el próximo paso será fijarnos en la relación existente entre el volumen y la superficie del molde; a ésta se le denomina radio medio. A efectos de cálculo del mismo se considera como volumen, no el de la pieza entera, sino el de las zonas más armadas. El radio medio del molde viene definido, entonces, por la ecuación 4.

$$R = \frac{V}{S} \quad (4)$$

Otra novedad que introduce este método es que tiene en cuenta el efecto pared, definido como la relación existente entre el tamaño máximo del árido D y el radio medio del molde R , es decir $\frac{D}{R}$. Esto hace que el método de Faury, como hemos indicado, sea especialmente adecuado en la construcción de piezas prefabricadas en las que predomina la superficie del molde sobre



su volumen, es decir, en aquellas piezas en las que el efecto pared tiene un valor importante.

El efecto pared considera que, al existir las paredes del molde aa' y las armaduras, los áridos gruesos se encuentran impedidos de entrar en los huecos que dejan entre sí los del mismo tamaño. En consecuencia, se requiere una mayor cantidad de árido fino que en el caso en que el molde tuviese por pared bb' , con lo cual para un contenido de cemento determinado se obtendrán resistencias más bajas.

Contrariamente, el empleo de gravas demasiado finas no es racional ya que la cantidad de agua de amasado es muy alta. Por todo esto, es natural que haya interés en emplear gravas cuyo tamaño máximo esté en relación con el radio medio de las piezas que se van a ejecutar.

De esta manera, el tamaño máximo del árido D a emplear para una pieza determinada de radio medio R debe cumplir con lo establecido en la ecuación 5.

$$0,8 < \frac{D}{R} \quad (5)$$

Como ultimo inciso referente al efecto pared, y para tener una idea del orden de magnitud, diremos que en estructuras de hormigón armado formadas por vigas y pilares con secciones y armaduras normales, las condiciones anteriores hacen que el tamaño máximo del árido deba estar comprendido entre 20 y 25 mm. En prefabricados estos condicionantes limitan aun mas en tamaño máximo del árido.

Determinado ya el tamaño máximo del árido en función del radio medio de la pieza que se va a fabricar, nuestro siguiente objetivo será hallar el volumen de huecos que existe entre los distintos granos de árido y de cemento. La experiencia demuestra que este volumen depende de la consistencia de la mezcla, de la naturaleza de los áridos, de su tamaño máximo y de la potencia de compactación, de manera que podemos saber el porcentaje de huecos en cada hormigón mediante cierta formula (que tiene en cuenta el efecto pared) deducida experimentalmente.



La cantidad de cemento es un dato del problema que suele darse en kilogramos de cemento por metro cubico de hormigón. Para pasar a volumen absoluto habrá, tan solo, que dividir por la densidad relativa del cemento. De esta manera obtendremos la proporción de cemento respecto al volumen aparente del hormigón en obra, pero lo que nos interesa es la proporción del volumen de cemento con relación al volumen absoluto de los materiales sólidos, es decir, la suma de los áridos y el cemento, ya que en el método de Faury, como en el de Bolomey, el cemento se considera como un árido mas.

Si tenemos en cuenta el valor del volumen de huecos que acabamos de obtener, pasaremos de uno a otro de manera sencilla; solamente debemos multiplicar el volumen de cemento necesario por metro cubico de hormigón por el inverso de la diferencia entre uno y el volumen de huecos hallado.

También a partir del porcentaje de huecos podemos encontrar la cantidad de agua a emplear en el hormigón; tan solo multiplicando la proporción de huecos por mil tendremos los litros de agua necesarios para amasar un metro cubico de hormigón. En el caso que el hormigón lleve aire incorporado, al volumen de huecos debemos restarle el volumen de aire para obtener la cantidad de agua.

Después de todo esto, el siguiente paso es determinar el porcentaje con el que debe figurar en la mezcla cada uno de los áridos. El método de Faury considera como una curva de referencia que permite obtener la máxima compacidad a la formada por una mezcla en proporciones variables de dos componentes: un conjunto de granos finos y medios (de tamaño 0 a $D/2$) por una parte, y el árido grueso ($D/2$ a D), por otra.

De esta manera, la curva de referencia de Faury está formada por dos rectas de diferente pendiente de acuerdo con los dos tipos de áridos anteriormente considerados. Estos dos segmentos se cortan en un punto, de abscisa (abertura de los tamices en escala proporcional a las raíces quintas de estas aberturas) $D/2$, cuya ordenada (tanto por ciento que pasa en volumen absoluto)



depende de D , de la forma de los granos del árido, de la ayuda de una ecuación.

Eligiendo valores medios de los parámetros que intervienen en dicha ecuación, la mezcla de áridos de tamaño 0 a $D/2$ es aproximadamente del 60% para $D=16$ mm y del 75% para $D=100$ mm. Para un hormigón con tamaño máximo del árido de 25 mm, el valor máximo de la ordenada corresponde a áridos machacados, con hormigón de consistencia fluida y efecto pared importante y es del 78%. El valor mínimo corresponde a áridos rodados, compactación muy enérgica y efecto pared despreciable y es del 54%.

La determinación de las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes tamaños de áridos para que la granulometría de la mezcla se ajuste a la de la curva de referencia puede realizarse mediante tanteos, que es un sistema básicamente gráfico, o por medio de los índices ponderales, más exacto que el anterior. Su explicación, que comporta cierto grado de detalle, puede encontrarse en multitud de libros; siendo este el último paso para encontrar la dosificación de nuestro hormigón, concluimos aquí con lo que ha sido una breve exploración del método Faury.

3.10.4. MÉTODO ACI

El sistema del American Concrete Institute (ACI 211.1-91) es, sin lugar a dudas, el método de dosificación más utilizado en todo el mundo, siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón. En las siguientes líneas se resumen los pasos que debemos seguir para dosificar nuestro hormigón.

Respecto al tamaño máximo del árido a emplear, el método ACI propone que sea el mayor posible (por razones de economía de cemento y de agua), siempre y cuando este tamaño máximo no sea mayor que $1/5$ de la dimensión menor de la pieza a hormigonar, ni mayor que $3/4$ de la separación mínima entre armaduras, ni de $1/3$ del espesor en el caso de unas losa.



Para la elección de la consistencia adecuada, usaremos el asentamiento más reducido posible compatible con la colocación adecuada del hormigón en obra. Los valores que se recomiendan de asentamiento en el cono de Abrams, en función de distintos tipos de construcción, pueden consultarse en una tabla.

A partir de la consistencia hallada, del tamaño máximo del árido elegido, de su forma y granulometría y de la cantidad de aire incorporado podemos hallar, con la ayuda de tablas, la cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón, siendo esta independiente de la cantidad de cemento empleada.

A diferencia del procedimiento habitual seguido en los métodos anteriormente expuestos, en el método ACI debemos fijar la relación agua/cemento. Esta se determina según predominen razones de durabilidad o de resistencia, ambos datos del problema.

Siguiendo el primer criterio podemos hallar la relación agua/cemento máxima, a través de tablas, en función del tipo de estructura que vamos a construir y de las condiciones de servicio a las que va a estar sometida.

Si nos basamos en la condición de resistencia a compresión para diseñar el hormigón, se indica la relación agua/cemento que debe emplearse, también en tablas, para conseguir las distintas resistencias en función de que incorporemos aire, o no, en nuestro hormigón. Destacamos que los valores de estas tablas que permiten obtener la cantidad de agua, de manera que, para una relación de agua/cemento constante, la resistencia del hormigón se reduce cuanto el contenido de aire aumenta.

Conocida la relación agua/cemento y la cantidad de agua, una sencilla operación nos permitirá determinar la cantidad de cemento que se ha de utilizar por metro cúbico de hormigón.

Nuestro siguiente objetivo es determinar las cantidades de árido grueso y de árido fino que intervienen en la mezcla. En el método ACI no se hace uso de las curvas de referencia como en los métodos anteriores.



En lo que respecta al árido grueso, es interesante que se utilice en la mayor cantidad posible, compatible con la docilidad, a fin de conseguir la máxima resistencia, la mínima cantidad de agua de amasado y la menor retracción.

Esta cantidad se determina mediante ensayos de laboratorio, sin embargo, si no se dispone de tales datos, puede obtenerse una indicación aceptable con la ayuda de tablas; estas proporcionan el volumen de árido grueso por unidad de volumen de hormigón en función del diámetro máximo del árido, de la docilidad y del módulo de finura de la arena. El peso de grava por metro cúbico de hormigón se calcula multiplicando el valor obtenido por mil y por la densidad de conjunto de la grava (en kg/dm^3), que es dato del problema.

El contenido de árido fino puede obtenerse por el método de los volúmenes absolutos o por el de los pesos, En el primero, el volumen de arena se halla restando a 1.025 el volumen de árido grueso, cemento, agua y aire. En el segundo, el peso del árido fino se determina como la diferencia entre el peso del hormigón fresco y la suma de los pesos de los otros componentes. Este sistema se basa en que, por experiencia, se conoce el peso del metro cúbico de hormigón fresco, aunque si esto no fuese así, pueden emplearse valores dados en tablas.

3.10.5. MÉTODO DE LA PEÑA

Este método de dosificación, publicado en 1955 por C. De La Peña, es el menos conocido.

La aplicación más idónea del método De La Peña es en hormigones estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes y, en general, hormigones en los que las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas.

Como en Füller y Bolomey, este método considera como tamaño máximo del árido el de la abertura del tamiz más pequeño de la



serie empleada que retenga menos del 25% de la fracción más gruesa del árido.

También la consistencia se determina de igual manera que en los otros dos métodos, es decir, se puede proporcionar como dato el tipo de consistencia deseada (o el asiento en el cono de Abrams relacionado), o bien pueden indicarse los medios de puesta en obra del hormigón y características del molde. Por ejemplo, en estructuras que vayan a ser vibradas se emplean las consistencias secas y plásticas, mientras que si se va a utilizar el picado con barra las consistencias blandas y fluidas con las adecuadas.

Respecto a la cantidad de agua necesaria por metro cubico de hormigón, seguiremos las indicaciones que el método realiza a través de tablas donde el agua es función de la consistencia, del tipo de árido (natural o machacado) y del tamaño máximo de la grava.

A continuación, nuestro objetivo será determinar la concentración o relación cemento/agua en peso. Para establecer una dosificación inicial puede utilizarse la ecuación 6.

$$Z = Kf_{cm} + 0,5 \quad (6)$$

En la que Z es la concentración (o relación cemento/agua, en peso) que queremos hallar, f_{cm} es la resistencia media del hormigón en N/mm^2 a 28 días medida en probeta cilíndrica y K es un parámetro cuyo valor, que depende del tipo de conglomerante y árido utilizado en el hormigón, podemos consultar en tablas.

El valor de la resistencia media del hormigón, f_{cm} , se determina a partir de los datos del problema, pues recordemos que el método De La Peña se basa en la resistencia a compresión para dosificar el hormigón.

Aunque no es lo más normal, a veces se proporciona la resistencia media que ha de tener el hormigón f_{cm} , con lo cual



sólo tenemos que sustituir dicho valor en la anterior ecuación; sin embargo, en la mayoría de ocasiones conoceremos la resistencia característica de proyecto, f_{ck} .

La relación existente entre la resistencia media que es preciso alcanzar en laboratorio para obtener una resistencia característica determinada en obra, depende de las condiciones de ejecución en ésta del hormigón. En función de éstas y de la resistencia característica de proyecto obtendremos una expresión que, de forma aproximada, nos permitirá determinar el valor de f_{cm} .

Una vez conocida la relación cemento/agua, en peso, y el volumen de agua en litros por metro cúbico de hormigón, tan solo hará falta multiplicar estos dos valores para obtener el peso de cemento, en kilogramos, para dicho volumen.

El último paso consiste en determinar la proporción en que se deben mezclar los áridos. En el método De La Peña, del mismo modo que en el ACI, no se utiliza una curva de referencia para este propósito. En este caso empleamos un gráfico con el que podremos establecer el porcentaje de arena, referido al volumen real del total del árido (abscisas), en función del módulo granulométrico de la arena (ordenadas) y del tamaño máximo del árido.

Si se trata de dos áridos (una arena y una grava), el porcentaje de arena con referencia al volumen real de todo el árido se determina en el gráfico entrando con el módulo granulométrico de la arena en ordenadas y viendo el punto en que la horizontal corta a la curva correspondiente al tamaño máximo del árido, en cuya vertical se tiene el porcentaje de arena en volumen, que restado a cien da el porcentaje de árido grueso.

En el caso de más de dos áridos, se empieza por considerar como 'arena' al más fino de todos ellos y como 'gravas' a todos los demás. Seguidamente, y valiéndose del gráfico citado, se calcula el porcentaje de 'arena' con cada una de las 'gravas' tomadas una a una. A partir de los porcentajes de arena que



resultan al considerar mezclas binarias con cada una de las gravas determinaremos la proporción en que deben ser mezclados los distintos áridos.

Es importante comentar que los valores hallados en el gráfico corresponden a un hormigón armado de consistencia adecuada para consolidar por picado con barra y en el que se han empleado áridos naturales de forma redondeada. Para hormigones con otras características es preciso aplicar, después de haber calculado el tanto por ciento de la mezcla de todos los áridos, las correcciones que De La Peña indica para distintos casos.

Finalmente, de los 1.025 litros que utilizaremos para conseguir un metro cúbico de hormigón restaremos el volumen de pasta de cemento (volumen de agua más volumen de cemento), de manera que obtendremos el volumen real que hay que repartir entre los distintos áridos con arreglo a los tantos por ciento ya calculados.

3.11. OTRAS METODOLOGÍAS

Existen cientos de métodos para dosificar hormigones. Un gran número de métodos propone curvas de referencia con el fin de determinar la proporción más idónea de gránulos que ha de tener el hormigón. Entre ellos destaca Füller, cuyo método hemos resumido anteriormente, y Bolomey, que modificó la fórmula de Füller con el propósito de incluir al cemento y de conseguir una curva de granulometría variable en función de la consistencia y de la forma de los áridos.

La Road Note 4 del Road Research Laboratory en el Reino Unido, A. Joisel y Faury en Francia, Jiménez Montoya en España y un largo etcétera, son métodos que utilizan curvas de referencia, siendo éstas de invención propia o procedentes de otros métodos



Básicamente, el punto débil que tiene el utilizar una curva granulométrica 'ideal' es que rara vez es posible (o económico) reproducir exactamente esta granulometría ideal con los materiales que obtenemos en el campo. Además, la granulometría puede ser ideal para cierta utilidad, pero podría no ser la mejor solución para distintos usos a la vez.

El método de dosificación ACI para hormigones convencionales es ampliamente utilizado en los EUA y en la mayoría de países americanos, y es uno de los métodos más conocidos y empleados en todo el mundo. Con todo, el sistema ACI presenta algunos puntos débiles, como las cantidades de agua por metro cúbico de hormigón indicadas en las tablas y el suponer que la resistencia sólo depende de la relación agua/cemento.

Si bien ya se han expuesto algunos de los métodos más clásicos y representativos, a continuación se comentan brevemente otros métodos también interesantes. Es importante observar que sólo se pretende dar una pincelada del panorama mundial.

3.11.1. MÉTODOS CON GRANULOMETRÍAS DISCONTINUAS

Del mismo modo que en los métodos con curvas granulométricas ideales, han sido muchos los partidarios del empleo de granulometrías discontinuas, por ejemplo D.A. Stewart. La técnica se basa en el uso de un árido grueso grande (normalmente de 40 mm) y, a menudo, de un solo tamaño, y de una arena relativamente fina, de manera que las partículas finas tendrán que rellenar los huecos que la falta de fracciones intermedias genera, dando lugar así a mezclas más dóciles que las conseguidas con granulometrías continuas (figura 11).

No obstante, existen algunos factores que limitan el uso de este tipo de mezclas. En primer lugar debemos considerar que, de la misma manera que ocurre con las granulometrías continuas

ideales, los áridos adecuados pueden ser económicamente no asequibles. Además, estas mezclas presentan más riesgos de segregación, de aquí que estas granulometrías se recomienden únicamente en mezclas que se compacten mediante vibración y en las que exista un buen control para evitar la segregación.

Según Day, las mezclas con granulometrías discontinuas pueden llegar a ser imbatibles cuando quién las utilice esté familiarizado con el tema, pero no recomienda en absoluto su uso general.

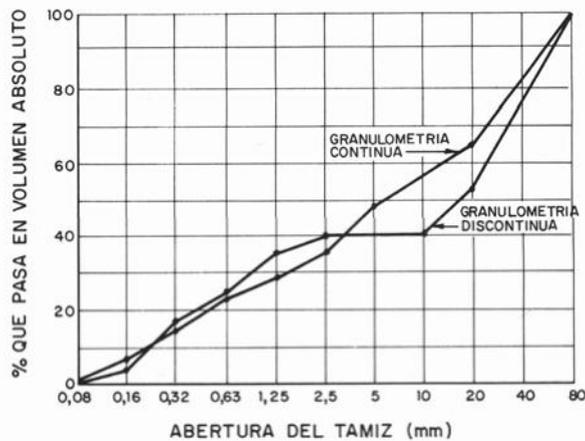


Figura 11: Granulometrías continua y discontinua (Fernández Cánovas, 1991)

3.11.2. MÉTODOS BASADOS EN MEZCLAS DE PRUEBA

El sistema más utilizado de entre los que se basan en realizar mezclas de prueba es, probablemente, el empleado en el Reino Unido por la British Ready Mixed Concrete Association (BRMCA).

En la mezcla inicial se usa una relación árido/cemento característica del rango que, probablemente, va a suministrarse en la práctica, siendo la proporción entre el árido fino y el grueso



ajustado a ojo hasta la obtención de las propiedades plásticas óptimas. A continuación se preparan una serie de mezclas con distintas cantidades de cemento y se determinan las distintas cantidades de agua demandadas, así como las resistencias que resultan. Los datos así obtenidos permiten la interpolación de propiedades del hormigón en incrementos de 5 o 10 kg en el contenido de cemento.

Aunque pueda parecer algo tosco, en realidad se trata de un proceso que está cuidadosamente especificado y proporciona resultados bastante respetables. Algunas desventajas que presenta el método son el tiempo y coste que implica, la necesidad de instalaciones adecuadas y personal experto y el no poder hacer frente a los cambios en las características de los áridos; es decir, mientras que el sistema es muy flexible en cuanto a las variaciones de resistencia (sabemos cómo modificar el contenido de cemento en función de esas variaciones), si la granulometría de la arena cambia todo el proceso debe ser repetido.

3.11.3. MÉTODO DE O'REILLY

El procedimiento propuesto por Vitervo O'Reilly [44] se utiliza en Cuba y en otros países de África y América. Una de las principales ventajas de este método es el ahorro de cemento que proporciona. En efecto, comparado con otros métodos (europeo, ACI), el método O'Reilly puede llegar a reducir en un 15% o más el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón. Esto tiene una repercusión económica muy importante en la industria de la construcción.

En el objetivo de lograr el máximo ahorro de cemento con las condiciones tecnológicas existentes, sin requerir nuevas inversiones o eventuales importaciones de aditivos químicos para las mezclas de hormigón, O'Reilly propone un método de dosificación a partir de la determinación de las características de los áridos a emplear, y en función de ellas se diseña la mezcla,



pues según demuestra existe una influencia cuantitativa de la forma de los áridos en el consumo de cemento.

El método consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y de agua se determina mediante factores que dependen de la relación agua/cemento y de la consistencia deseada de la mezcla.

3.11.4. MÉTODO DE POPOVICS

El trabajo realizado por el profesor Sandor Popovics, reconocido experto en el ámbito del hormigón a escala internacional, aporta un gran número de relaciones cuantificadas entre las propiedades de los materiales componentes de la mezcla y las características del hormigón que resulta. Aunque no podemos hablar de un 'sistema Popovics', lo cierto es que toda esta información resulta básica a la hora de diseñar cualquier método de dosificación, así como para el análisis de los ya existentes. En las siguientes líneas se comentan, brevemente, algunas ideas del citado autor.

Popovics muestra una gran predilección por el uso del módulo de finura para determinar la proporción de árido fino y grueso y también para estimar la cantidad de agua necesaria que debe contener la mezcla; sin embargo, reconoce que el módulo de finura no proporciona, necesariamente, la seguridad adecuada frente a una cantidad inapropiada de partículas muy finas.

Así, Popovics considera que éstas deben ser reguladas, básicamente, gracias al sentido común, aunque también propone utilizar su criterio $D-m-s$, en el que D es el tamaño máximo del árido, m el módulo de finura y s la superficie específica. Según el autor, el exigir el mismo módulo de finura y la misma superficie específica simultáneamente es muy



similar a requerir una granulometría idéntica, por lo que deducimos que el criterio $D-m-s$ tendrá los mismos inconvenientes que utilizar como referencia una granulometría ideal.

Como podemos adivinar, existe una fuerte oposición por parte de Popovics en lo referente al uso de la superficie específica como único criterio en la elección de la granulometría del árido. Es necesario recordar que existe una diferencia fundamental entre los resultados obtenidos con partículas muy finas y muy gruesas según el criterio utilizado (superficie específica o módulo de finura); mientras que la superficie específica sobrestima el efecto de las partículas más finas y atribuye poca influencia a los tamaños mayores, con el módulo de finura para exactamente lo contrario.

3.11.5. RILEM TECHNICAL COMMITTEE TC 70-OMD

En 1983, la institución RILEM estableció el Technical Committee TC 70-OMD con el fin de preparar recomendaciones para optimizar la dosificación de hormigones en función de las distintas aplicaciones requeridas. La idea era que los métodos de dosificación debían basarse en modelos físicos y matemáticos, "ya que de este modo son particularmente adecuados para su uso en ordenador".

Este comité, formado por 24 miembros de 12 países, realizó un experimento cuyos sorprendentes resultados ponen de manifiesto el poco acuerdo existente entre los distintos métodos de dosificación. Ocurrió que, con la finalidad de comparar resultados entre varios modelos de dosificación, los miembros del comité tuvieron que calcular (utilizando cada uno su modelo de dosificación) las proporciones de los distintos componentes de un hormigón convencional, esto es, contenidos de agua, cemento y áridos, etc., a partir de la resistencia a compresión media y de la consistencia.



El comité quedó bastante sorprendido por la gran variación entre las predicciones de las doce dosificaciones recibidas; por ejemplo, las cantidades de cemento y relaciones agua/cemento recibidas variaban por encima de los 300 kg/m^3 y 0,2 respectivamente. Claramente, algunas de las mezclas calculadas resultaban en un hormigón de consistencia inservible y otras proporcionaban una resistencia marcadamente distinta de la especificada; algunos métodos tenían en cuenta, por ejemplo, la cantidad de aire incorporado, otros eran aplicables a hormigones no convencionales y sólo uno consideraba otra propiedad que no fuera la resistencia y consistencia.

En base a los resultados obtenidos, y aunque sólo se trate de un ejemplo, tal vez podamos hacernos una idea de por qué los sistemas de dosificación teóricos son tratados, a veces, con un gran recelo por la industria.



MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA Y DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS



4. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA Y DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS

4.1. INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS

4.1.1. LA IMPORTANCIA DE PLANIFICAR LA EXPERIMENTACIÓN

La experimentación juega un papel fundamental en virtualmente todos los campos de la investigación y el desarrollo. El objetivo de la experimentación es obtener información de calidad. Información que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico,...) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas, etc.

Obviamente la experimentación se debe planificar (diseñar) cuidadosamente para que proporcione la información buscada. Dicha planificación debe considerar dos aspectos importantes relacionados con toda experimentación:

1. La experimentación es normalmente cara. La capacidad de experimentar está limitada por el coste en tiempo y en recursos (personal, productos de partida, etc.). Por tanto, una organización óptima de la experimentación deberá contemplar el menor número de experimentos que permita obtener la información buscada.

2. El resultado observado de un experimento (y) tiene incertidumbre:

$$y = h + e \quad (7)$$



donde " h " es el resultado "verdadero" (desconocido) del experimento y " e " es una contribución aleatoria, que varía cada vez que se repite el experimento. Por ello, la estadística, disciplina que proporciona las herramientas para trabajar en ambientes de incertidumbre, juega un papel fundamental en el diseño de los experimentos y en la evaluación de los resultados experimentales.

El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el sistema en estudio y decidir actuaciones futuras. Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el coste elevado de la experimentación no parece adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de los resultados a la mera intuición del experimentador. Parece más razonable utilizar una metodología matemática y estadística que indique como planificar (diseñar, organizar) la secuencia de experimentos de una forma óptima, de modo que se minimice tanto el coste de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada. Dicha planificación y análisis es el principal objetivo del Diseño Estadístico de Experimentos.

¿Qué es el Diseño Estadístico de Experimentos?

Se podría definir el Diseño Estadístico de Experimentos (DEE), también denominado diseño experimental, como una metodología basada en útiles matemáticos y estadísticos cuyo objetivo es ayudar al experimentador a:

1. Seleccionar la estrategia experimental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo coste.
2. Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

¿En qué situaciones se aplica el Diseño Estadístico de Experimentos?

Las situaciones en las que se puede aplicar el DEE son muy numerosas. De forma general, se aplica a sistemas como el mostrado en la Figura 12, en los cuales se observan una o más variables experimentales dependientes o respuestas (y) cuyo valor depende de los valores de una o más variables independientes (x) controlables llamadas factores. Las respuestas además pueden estar influidas por otras variables que no son controladas por el experimentador. La relación entre x e y no tiene porque ser conocida.

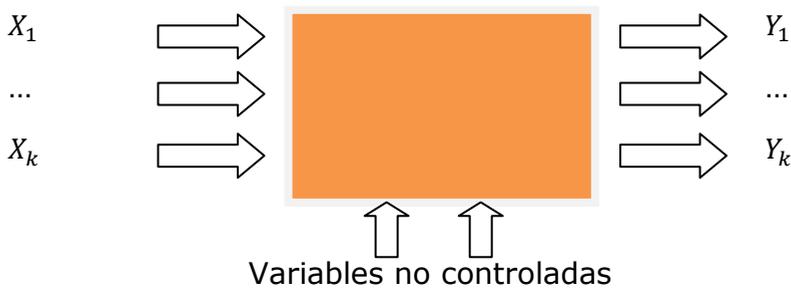


Figura 12: Representación de un sistema en estudio en DDE: factores (x), respuestas (y)

¿Qué objetivos se suelen perseguir al estudiar sistemas como los descritos?

La experimentación en sistemas como el descrito en la Figura 12 suele perseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtener un conocimiento inicial sobre un nuevo sistema en estudio. ¿En qué valores de los factores se puede centrar la investigación?



- Determinar la influencia de los factores sobre las respuestas observadas. De entre todos los factores que afectan al proceso, ¿Cuales influyen más?, ¿Cómo interaccionan entre ellos?
- Optimizar respuestas. ¿Qué valores de los factores proporcionan las respuestas de mayor calidad?
- Determinar la robustez del sistema. ¿Cómo afectan a la respuesta variaciones no controladas en el valor de los factores?

4.1.2. EL MÉTODO TRADICIONAL DE EXPERIMENTACIÓN

El método tradicional de experimentación, el que quizás surge de forma más intuitiva para estudiar el sistema de la Figura 12, consiste en variar un factor cada vez (VUFCV): a partir de unas condiciones iniciales, se realizan experimentos en los cuales todos los factores se mantienen constantes excepto el que se está estudiando. De este modo, la variación de la respuesta se puede atribuir a la variación del factor, y , por tanto, revela el efecto de ese factor. El procedimiento se repite para los otros factores. El razonamiento que soporta esta forma de actuar es que si se variaran dos o más factores entre dos experimentos consecutivos, no sería posible conocer si el cambio en la respuesta ha sido debido al cambio de un factor, al de otro, o al de todos a la vez.

La Figura 14a ilustra el estudio del efecto de tres factores (A, B y C) sobre el rendimiento de una reacción química. El método VUFCV aplicado al factor A consiste en realizar un experimento a unos valores determinados de B y C pero a dos valores distintos de A (puntos 1 y 2). La variación en la respuesta indica el efecto de A sobre la respuesta. El procedimiento se repite para los otros dos factores. Para reducir la incertidumbre de los efectos observados se pueden repetir los experimentos.



Figura 13: Esquema del método tradicional

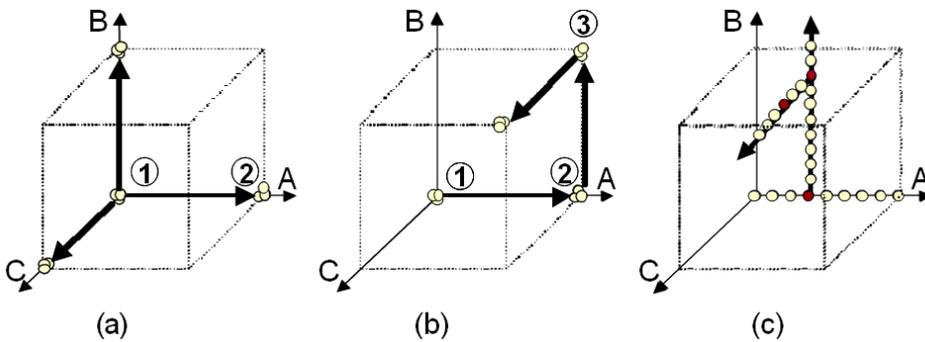


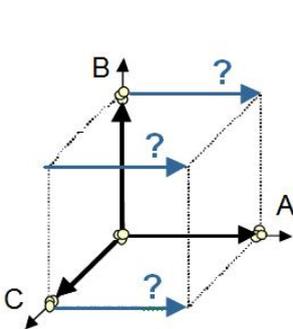
Figura 14: Experimentación variando un factor cada vez

El método VUFCV también se utiliza para hallar qué valores de los factores optimizan una respuesta. Se experimenta en dos condiciones distintas (Figura 14b, puntos 1 y 2) variando el factor A. Se escoge como valor óptimo de A aquel que proporciona la mejor respuesta. Se fija este valor, y se utiliza como nuevo punto de partida para variar el factor B (punto 3) y así sucesivamente. El incremento al variar cada factor depende de la precisión con la que se desee localizar el óptimo (Figura 14c).

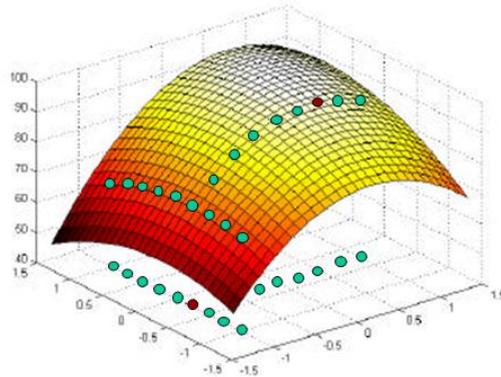
4.1.3. LOS INCONVENIENTES DEL MÉTODO TRADICIONAL

La estrategia experimental VUFCV presenta inconvenientes importantes cuando existe interacción entre factores. Existe interacción entre dos factores A y B cuando el efecto del factor A es diferente según qué valor tome el factor B, y viceversa. Esta situación se presenta muy a menudo en química, física, biología, etc. Cuando existen tales interacciones, el método VUFCV:

- No informa sobre como un factor interactúa con los otros factores o como estas interacciones afectan a la respuesta, con lo cual sólo se obtiene una comprensión limitada de los efectos de los factores (Figura 15a). ¿Cuál es el efecto de A cuando los otros factores toman otros valores?



(a) Efecto de los factores



(b) Optimización

Figura 15: Limitaciones de la experimentación variando un factor cada vez

- No proporciona la posición del óptimo (Figura 15b). El experimentador percibe que se ha llegado al óptimo porque cambiando un factor cada vez la respuesta no mejora, pero se puede encontrar lejos del óptimo real. Aunque se puede reiniciar la experimentación partiendo del "óptimo" encontrado, esta solución es extremadamente ineficiente cuando se deben estudiar muchos factores a muchos



valores distintos, puesto que el método VUFCV requeriría demasiados experimentos y demasiado tiempo.

¿Qué método utilizar en lugar del método tradicional?

Los inconvenientes del método tradicional provienen de variar un factor cada vez. La solución, por lo tanto, debe consistir en variar más de un factor simultáneamente al realizar un nuevo experimento. Ello permitiría mejorar la eficiencia del esfuerzo experimentador, y obtener información sobre las interacciones. La dificultad estriba en diseñar una experimentación reducida, donde estos cambios simultáneos se complementen entre sí y permitan obtener la información buscada al combinar los resultados de todos los experimentos.

El DEE proporciona el marco matemático para cambiar todos los factores simultáneamente, y obtener la información buscada con un número reducido de experimentos, es decir, con la máxima eficiencia. El DEE conduce a una planificación con menos experimentos que el método VUFCV para obtener un conocimiento equivalente.

4.1.4. PROCEDIMIENTO DE LA APLICACIÓN DEL DEE

La aplicación del diseño de experimentos requiere considerar las siguientes etapas que se comentarán a continuación:

1. Comprender el problema y definir claramente el objetivo.
2. Identificar los factores que potencialmente podrían influir en la función objetivo, y los valores que éstos pueden tomar. Entre estos valores se buscará la información necesaria.
3. Establecer una estrategia experimental, llamada plan de experimentación.



4. Efectuar los experimentos con los valores de los factores decididos en el punto 3 para obtener los valores de las respuestas estudiadas.
5. Responder las preguntas planteadas, sea directamente, sea utilizando un modelo matemático. Si es necesario, volver a la etapa 1.

Comprender el problema y definir claramente el objetivo.

El DEE es una herramienta para encontrar respuestas a problemas perfectamente identificados y especificados. Cuanto más claramente se plantea el problema y se identifica el propósito o información que se desea conseguir con los experimentos, mayor puede ser la ayuda del DEE. Para obtener una comprensión profunda del sistema y del problema es necesario recopilar toda la información disponible sobre el sistema en estudio y que pueda ser relevante para la experimentación que se realizará.

A continuación se debe definir qué respuesta experimental (o características de interés) se va a observar. Según el objetivo perseguido, puede ser necesario observar más de una respuesta y encontrar un compromiso entre ellas.

Identificar los factores y el dominio experimental de interés.

Es muy importante identificar y listar todos los factores (las variables independientes) que se cree que pueden tener influencia en el proceso y en la respuesta, aunque se crea que pueden tener poca importancia. Se debe considerar si cada factor especificado se mantendrá constante, se variará controladamente, si es incontrolable pero se pueden conocer sus valores o si es incontrolable e imposible de medir.

El experimentador debe ser consciente de la influencia potencial de podría tener cada factor en la respuesta. Los

factores no controlados pueden introducir variaciones en la respuesta que dificultan el análisis de los resultados experimentales.

Para cada factor se debe definir el intervalo de valores que puede tomar (dominio experimental). La combinación del dominio de todos los factores configura el dominio experimental posible (o dominio de los factores). Éste contiene los experimentos que, en principio, se podrían realizar. La Figura 16 muestra tres factores continuos, A, B y C. Si sólo se estudiará el factor A, la Figura 16a indica distintos experimentos que se pueden realizar con diferentes valores de A, a unos valores fijados de B y C. Si además se estudiará el factor B, éste puede tomar distintos valores para cada valor de A, con lo cual el dominio posible es más amplio (Figura 16b). El dominio experimental se va ampliando a medida que se añaden más factores (Figura 16c).

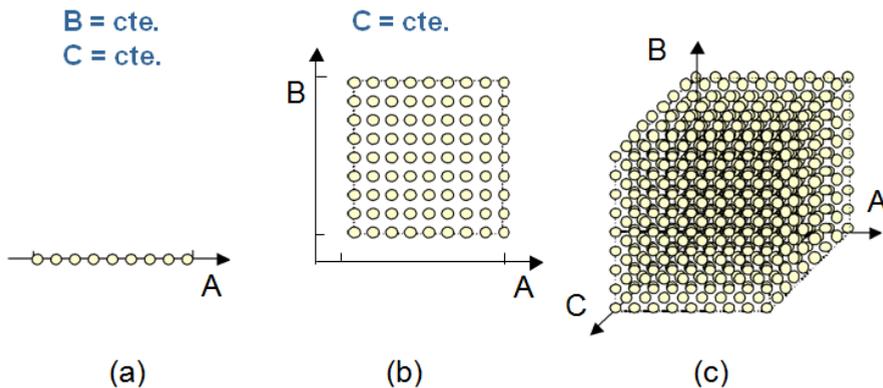


Figura 16: Dominio experimental como combinación de los dominios particulares de cada factor

No siempre cualquier combinación de valores de factores es posible o deseable. Pueden existir restricciones experimentales, técnicas o económicas por las cuales el dominio experimental inicial se reduce a un dominio experimental de interés. Por ejemplo, tras excluir aquellos experimentos que no interesan por su peligrosidad, su elevado coste o porque supone una combinación de los factores que no se adapta a las



especificaciones del producto. De entre todos los experimentos restantes, se escogerán los que se van a realizar para obtener la información buscada.

Hay que notar que la elección de los factores y de su dominio experimental no suele ser fácil. Es el experimentador quien decide donde es interesante estudiar dichos factores. Esta decisión requiere un conocimiento previo del sistema, obtenido de referencias bibliográficas, experiencia previa en el laboratorio, etc.

Planificar la experimentación. Elección del diseño experimental

Es frecuente realizar la experimentación en diversas etapas secuencialmente. En cada etapa, las series de experimentos se agrupan en diseños denominados matrices de experimentos. A continuación se identifican distintos objetivos y los tipos de diseños que se pueden aplicar a cada caso. Estos diseños se comentarán en artículos posteriores de esta serie.

Cribado: Al plantear por primera vez una experimentación no es extraño encontrar una larga lista de factores potencialmente influyentes. Puesto que el número de experimentos que suele requerir un estudio detallado u optimización de un sistema aumenta exponencialmente con el número de factores estudiados, es necesario reducir la lista de factores a un número manejable. Los factores no se deberían conservar o eliminar utilizando razones subjetivas como por ejemplo, escoger aquellos para los cuales se dispone del material adecuado en el laboratorio, o aquellos que son más fáciles de controlar. Se deben cribar en función de su influencia en la respuesta considerando su significancia estadística. Para determinar dicha influencia, se puede realizar una investigación exploratoria con un diseño experimental sencillo, que permita determinar lo más rápidamente posible (es decir, utilizando el menor número de experimentos) qué factores tienen más influencia en la respuesta y deben ser estudiados en detalle (los factores clave) y cuáles pueden no considerarse porque sus efectos son insignificantes. Entre los diseños adecuados para realizar un cribado destacan las



matrices de Hadamard, las cuales permiten estudiar el efecto de hasta $N-1$ factores con sólo N experimentos.

Estudio de los factores: Una vez se han identificado los pocos factores más importantes, el siguiente paso suele ser estudiar cuantitativamente su efecto sobre la respuesta y sus interacciones. Para este propósito se pueden utilizar los diseños factoriales completos a dos niveles 2^k y los factoriales fraccionados 2^{k-r} entre otros. Éstos últimos contemplan un número menor de experimentos que los factoriales completos a costa de no obtener ciertas informaciones que a priori se consideran irrelevantes.

Optimización: Una objetivo último de la investigación suele ser la optimización de una o varias respuestas en un producto o proceso. Es decir, conocer qué valores de los factores proporcionan respuestas (rendimiento, sabor, etc.) con la calidad deseada. Estos se pueden conocer calculando un modelo matemático (denominado superficie de respuesta) que relaciona los factores más relevantes con las respuestas. Los experimentos más adecuados para calcular dichos modelos están descritos en los diseños de superficies de respuesta tales como el diseño central compuesto o el diseño de Doehlert. El método secuencial Simplex es una alternativa al cálculo de un modelo matemático para alcanzar las condiciones óptimas. En este método, cada futuro experimento se decide en función de los resultados obtenidos en los experimentos anteriores.

Estudio de mezclas: Los problemas de mezclas son también muy comunes en las industrias de la química, alimentación y bebida, cosméticos y medicamentos entre otras. Su particularidad es que los factores expresan porcentajes de los constituyentes y suman 100%. Esta restricción requiere el uso de diseños y modelos matemáticos adecuados a este tipo de restricciones.

Por último, si el problema en cuestión no se ajusta a ninguno de los diseños clásicos mencionados anteriormente, aún es posible encontrar un diseño óptimo utilizando algoritmos que permiten



seleccionar los experimentos más adecuados de entre una lista de experimentos candidatos.

Realización de la experimentación.

El diseño experimental escogido suele estar descrito mediante variables codificadas. Estas se particularizan para los factores en estudio, se comprueba si los experimentos son posibles y, si es así, se realiza la experimentación en orden aleatorio respecto al orden en el cual están listados. La ejecución en orden aleatorio es necesaria para asegurar que los factores no contemplados introduzcan confusión y sesgo en los resultados.

Interpretar los resultados.

Una vez se dispone de los resultados experimentales se pueden calcular los efectos de los factores, así como sus interacciones. Los tests estadísticos permiten comprobar si los efectos calculados son significativos comparándolos con el error experimental. Si se construye un modelo de superficies de respuesta, se pueden calcular los coeficientes por el método de los mínimos cuadrados y se puede evaluar el modelo realizando réplicas de ciertos experimentos y aplicando el test ANOVA. El modelo se puede utilizar para buscar la zona óptima matemáticamente.

Es importante notar que la realización de estas etapas es cíclica. La información obtenida al realizar una serie de experimentos se debe integrar para planificar la experimentación posterior. Quizás entonces se comprende mejor el problema y se pueden redefinir o concretar más los objetivos, se pueden descartar factores que se ha visto que no eran importantes, o modificar su dominio experimental, con ello se planea una nueva experimentación, y así sucesivamente. Por este motivo, se prefiere normalmente efectuar los experimentos en pequeñas series.

4.2. MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

4.2.1. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

La Metodología de Superficies de Respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y , a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

Cuando decimos que el valor real esperado, η , que toma la variable de interés considerada está influido por los niveles de k factores cuantitativos, X_1, X_2, \dots, X_k , esto significa que existe alguna función de X_1, X_2, \dots, X_k (que se supone continua en $X_i, \forall i = 1, \dots, k$) que proporciona el correspondiente valor de η para alguna combinación dada de niveles:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (8)$$

de tal forma que la variable respuesta puede expresarse como la ecuación 9:

$$Y = \eta + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (9)$$

donde ε es el error observado en la respuesta.

La relación $\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ existente entre η y los niveles de los k factores puede representarse a través de una hipersuperficie (subconjunto de un espacio euclídeo $(k+1)$ -dimensional) a la que llamaremos superficie de respuesta.

Una técnica utilizada para ayudar a visualizar la forma que puede tener una superficie de respuesta tridimensional consiste en representar la gráfica de contornos de la superficie, en la que se

trazan las denominadas líneas de contorno, que son curvas correspondientes a valores constantes de la respuesta sobre el plano X_1X_2 (plano cuyos ejes coordenados vienen dados por los niveles X_1 y X_2 de los factores). Geométricamente, cada línea de contorno es una proyección sobre el plano X_1X_2 de una sección de la superficie de respuesta al intersectar con un plano paralelo al X_1X_2 . La gráfica de contornos resulta útil para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta.

La existencia de gráficas de contorno no está limitada a 3 dimensiones a pesar de que en el caso en que haya más de 3 factores de influencia no es posible la representación geométrica. No obstante, el hecho de poder representar gráficas de contorno para problemas en que haya 2 o 3 factores permite visualizar más fácilmente la situación general.

4.2.2. SUPERFICIES DE RESPUESTA POLINÓMICAS. MODELOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN

La forma de la función f que determina la relación entre los factores y la variable respuesta es, en general, desconocida, por lo que el primer objetivo de la MSR consiste en establecer experimentalmente una aproximación apropiada de la función f . Para ello, se propone un modelo de ecuación, generalmente polinómico, en los k factores X_1, X_2, \dots, X_k y se selecciona un conjunto de tratamientos sobre los que realizar las observaciones experimentales, que se utilizarán tanto para obtener estimaciones de los coeficientes en el modelo propuesto (por ejemplo, a través del método de mínimos cuadrados) como para obtener una estimación de la variación del error experimental (para lo que es necesario tener al menos 2 observaciones por cada tratamiento). Se realizan, entonces, contrastes sobre las estimaciones de los parámetros y sobre el ajuste del modelo y si el modelo se considera adecuado, puede utilizarse como función de aproximación. En tal caso, el estudio de la superficie de respuesta

se hace en términos de la superficie ajustada, pues su análisis será aproximadamente equivalente al del sistema real.

Los polinomios usados más frecuentemente como funciones de aproximación son los de órdenes uno y dos, que nos proporcionan, respectivamente los siguientes modelos:

Modelo de primer orden \equiv

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (10)$$

Modelo de segundo orden \equiv

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (11)$$

4.2.3. UTILIZACIÓN DE VARIABLES CODIFICADAS

En la construcción de modelos de superficies de respuesta, es muy común la codificación de los valores reales de los niveles de los factores, pues las distancias medidas sobre los ejes de las variables codificadas en el espacio k-dimensional se convierten en estándar, lo que facilita considerablemente los cálculos que deben llevarse a cabo para obtener el modelo de aproximación e incrementa el ajuste en la estimación de los coeficientes.

Una fórmula que suele resultar útil para codificar los valores de los factores es la ecuación 12.

$$X_i = \frac{X_i - \left(\frac{X_{iNSup} + X_{iNInf}}{2} \right)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} = \frac{X_i - (\bar{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

donde $X_{iNInf} \equiv$ valor del nivel más bajo del factor i y $X_{iNSup} \equiv$ valor del nivel más alto del factor i y:

$$\tilde{X}_i = \frac{X_{iNSup} + X_{iNInf}}{2} \quad (13)$$

es la media entre los valores más alto y más bajo del nivel $i = 1, \dots, n$. La fórmula anterior verifica que:

$$\sum_{i=1}^k X_i = 0 \quad (14)$$

y transforma las medias $\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_k$ en el punto $(X_1, \dots, X_k) = (0, \dots, 0)$ al que se denomina centro del diseño.

Las fórmulas empleadas para la codificación dan lugar a transformaciones biyectivas entre variables reales y codificadas, de manera que cualquier ecuación polinómica en los valores de X_i se puede expresar equivalentemente como una ecuación polinómica del mismo grado en los valores de \tilde{X}_i . Por tanto, a partir de ahora se trabajará con las variables codificadas, pues las conclusiones que se obtengan sobre éstas pueden extrapolarse a las variables reales.

4.2.4. MODELOS DE PRIMER ORDEN

Cuando no se tiene suficiente información acerca de la forma que presenta la superficie de respuesta, el primer intento de ajuste se hace, generalmente, aproximando a través de un modelo de primer orden.

La forma general de un modelo de primer orden con k factores, X_1, X_2, \dots, X_k , es como indica la ecuación 15.

$$\underbrace{Y}_{\substack{\text{variable} \\ \text{respuesta}}} = \beta_0 + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_i X_i}_{\substack{\text{parametros} \\ \text{desconocidos}}} + \underbrace{\varepsilon}_{\substack{\text{error} \\ \text{aleatorio}}} \quad (15)$$

o, equivalentemente, en forma matricial:

$$Y = X \beta + \varepsilon \quad (16)$$

donde la matriz X puede escribirse alternativamente como $X = [1 : D]$, con D la matriz de combinaciones de niveles de los factores, denominada matriz de diseño.

Si la matriz X es de rango completo, entonces el estimador de β obtenido por el método de mínimos cuadrados es $b = (X' X)^{-1} X' Y$ (que es, de hecho, el mejor estimador lineal insesgado de β) y la matriz de varianzas-covarianzas de b viene dada por $\text{Var}(b) = (X' X)^{-1} \sigma^2$.

El modelo de primer orden ajustado es, como define la ecuación 17.

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i \quad (17)$$

Si el modelo está bien ajustado, la parte no aleatoria del modelo representa la respuesta real esperada y ε es el error experimental. Sin embargo, si el modelo no está ajustado a la función respuesta real, lo que ocurre cuando la relación entre la respuesta y los factores está demasiado simplificada, ε contiene, además del error experimental, una parte de error no aleatorio que se debe a la falta de ajuste.

4.2.5. MODELOS DE SEGUNDO ORDEN

Cuando existe curvatura en la superficie de respuesta, el modelo de primer orden no es una aproximación adecuada y es necesario

utilizar un modelo que ajuste mejor. Se emplea entonces un modelo de segundo orden.

La forma general de un modelo de segundo orden con k factores, X_1, X_2, \dots, X_k es, tal como se expresa en la ecuación 18.

$$\underbrace{Y}_{\substack{\text{variable} \\ \text{respuesta}}} = \beta_0 + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^k \beta_{ij} X_i X_j}_{\text{parámetros desconocidos}} + \underbrace{\varepsilon}_{\substack{\text{error} \\ \text{aleatorio}}} \quad (18)$$

4.2.6. NATURALEZA SECUENCIAL DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

La RSM (Response Surface Methodology) es una técnica secuencial. A menudo, la estimación inicial de las condiciones óptimas de operación está alejada del óptimo real, así que el objetivo es, usando un método lo más simple y menos costoso posible, moverse rápidamente hacia las cercanías del óptimo.

En general, se sabe muy poco o nada acerca de la relación existente entre la variable respuesta y los factores, así que, en un principio, se propone el modelo de aproximación más simple posible, el de primer orden, que suministra la base para ejecutar un conjunto inicial de experimentos que proporcionarán datos correspondientes a los puntos del diseño de primer orden. Si los datos recogidos permiten hacer una estimación de la varianza del error, se puede llevar a cabo un contraste para evaluar el ajuste del modelo. Esto nos lleva a una segunda etapa, que consiste en localizar áreas de la región experimental en las que se sospeche que puedan estar los valores más deseables de la variable respuesta. El plan que vamos a seguir, que nos llevará hacia valores máximos en la respuesta, se conoce como método de máxima pendiente en ascenso (en descenso si lo que queremos es minimizar los valores de la respuesta).



4.2.7. MÉTODO DE MÁXIMA PENDIENTE EN ASCENSO

El método de máxima pendiente en ascenso consiste en ejecutar una secuencia de experimentos a lo largo de la línea de máximo incremento de la respuesta. Si el modelo ajustado de primer orden es adecuado, la información que éste proporciona se utiliza para determinar una dirección en la cual se espere observar mayores valores de la variable respuesta. A medida que se avanza sobre la superficie ajustada en la dirección en que se incrementan los valores de la respuesta y se va llegando a una región en la que haya curvatura en la superficie real, el incremento en la respuesta se estabilizará en el punto más alto de la superficie ajustada. Si se continúa en esta dirección y la altura de la superficie disminuye, se lleva a cabo un nuevo conjunto de experimentos y se ajusta de nuevo el modelo de primer orden. Se determina una nueva dirección hacia valores crecientes de la respuesta y se ejecuta otra secuencia de experimentos en la dirección determinada. Este proceso continúa hasta que se hace evidente que a partir del método no se puede obtener un incremento en la respuesta o éste es muy pequeño.

Si los tests de ajuste detectan que puede haber curvatura en la superficie, se aumenta un grado al modelo añadiéndole los términos del producto cruzado y/o los términos cuadráticos puros y se completa el diseño de primer orden añadiéndole los puntos necesarios para ajustar el nuevo modelo de segundo orden. Si el modelo de segundo orden se ajusta adecuadamente, se utiliza para describir la forma de la superficie a través de la gráfica de contornos en la región experimental. Se utiliza entonces el modelo ajustado de segundo orden para localizar, en el lugar en el que la pendiente de la superficie ajustada es cero, las coordenadas del punto estacionario, que es el punto que proporciona el valor óptimo de la variable respuesta y, si se detecta que éste se encuentra dentro de los límites de la región experimental, se pasa a determinar su naturaleza (si es máximo, mínimo o punto de silla). Si, por el contrario, el punto estacionario no se halla dentro de la región experimental, hemos



de realizar una nueva experimentación en la dirección en la que éste se encuentra. Una vez que se ha localizado el punto que proporciona valores óptimos de la variable respuesta, se describe la superficie en un entorno próximo a éste.

4.3. DISEÑOS DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

La elección de un diseño adecuado del experimento a realizar es fundamental para modelar y explorar la superficie de respuesta usada para ajustar un modelo polinómico al conjunto de datos recogidos en los puntos del diseño. Así pues, sería deseable que el diseño tuviera, de las características que se enumeran a continuación, y dado que algunas de ellas resultan conflictivas entre sí, las que más sirvan al interés del experimento:

1. Generar una distribución razonable de puntos y, por tanto, de información, en toda la región de interés, pero utilizando el menor número posible de puntos experimentales.
2. Asegurar que, para cada punto x , el valor ajustado, $\hat{Y}(x)$, está tan cerca como sea posible del valor real, $Y(x)$.
3. Permitir la detección de falta de ajuste en el modelo.
4. Permitir la ejecución de los experimentos en bloques.
5. Permitir la construcción secuencial de diseños de orden creciente.
6. Proporcionar una estimación interna de la varianza del error.
7. Asegurar simplicidad en los cálculos de las estimaciones de los parámetros del modelo.

Además de las propiedades mencionadas, sería muy conveniente que el diseño elegido fuera ortogonal y/o invariante por rotación:



Un diseño ortogonal es aquel en el que los términos del modelo ajustado son incorrelados y, por tanto, también las estimaciones de los parámetros lo son, en cuyo caso, la varianza de la respuesta esperada en cualquier punto de la región experimental se puede expresar como la suma ponderada de las varianzas de los parámetros estimados del modelo.

Por otro lado, en un diseño invariante por rotación, la varianza de $\hat{Y}(x)$, que depende de la situación del punto x , es función únicamente de la distancia del punto al centro del diseño, lo que significa que es la misma en todos los puntos equidistantes del centro del diseño. Teniendo en cuenta que el objetivo de la RSM es la optimización de la respuesta y que se desconoce la localización del óptimo antes de ejecutar el experimento, esta propiedad resulta muy interesante, puesto que garantiza que el diseño proporciona estimaciones igualmente precisas en todas las direcciones.

4.3.1. DISEÑOS DE PRIMER ORDEN

Los diseños considerados con el propósito de recoger datos para ajustar un modelo de primer orden se conocen como diseños de primer orden.

Un criterio razonable para la elección de un diseño de primer orden adecuado es la minimización de $\text{Var}(\hat{Y})$, lo que se logra minimizando la varianza de los estimadores de los parámetros β_i , $i = 1, \dots, k$. Hay una única clase de diseños que lo consiguen, los ortogonales, que en los modelos de primer orden son aquellos para los que se verifica que los elementos de fuera de la diagonal principal de la matriz $X'X$ son cero, lo que nos permite determinar de manera independiente los efectos de los k factores (medidos a través de los valores de b_i , $i = 1, \dots, k$). Además, se verifica que todo diseño ortogonal de primer orden es invariante por rotación. Por tanto, consideraremos únicamente aquellos diseños de primer orden que son ortogonales y, en particular, los diseños factoriales 2^k y las fracciones de diseños factoriales 2^k .

4.3.2. DISEÑOS FACTORIALES 2^k

En un diseño factorial 2^k , para cada factor se consideran dos niveles, que pueden codificarse en los valores +1 (para el más alto) y -1 (para el más bajo). Considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los k factores, se obtiene una matriz de diseño de 2^k filas, cada una de las cuales representa un tratamiento.

Los diseños factoriales 2^k presentan el inconveniente de que, salvo que se repitan algunas observaciones, no permiten la estimación del error experimental. Una técnica habitual para incluir repeticiones consiste en aumentar el diseño con algunas observaciones en el centro, pues esto no influye sobre las estimaciones de los parámetros y no altera la ortogonalidad del diseño, aunque como resultado, la estimación de β_0 es la media de todas las observaciones.

4.3.3. FRACCIONES DE DISEÑOS FACTORIALES 2^k

Estamos considerando los diseños factoriales 2^k para ajustar los modelos de primer orden, pero si se recogen datos en todos los puntos es posible, en realidad, estimar todos los coeficientes de un modelo de la forma expresada en la ecuación 19.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{i=1 < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \sum_{i=1 < j < l}^k \beta_{ijl} X_i X_j X_l + \dots + \beta_{12\dots k} X_1 X_2 \dots X_k + \varepsilon \quad (19)$$

En el que los términos adicionales de mayor orden están asociados con las interacciones entre los factores. De esta manera, el número de puntos del diseño, y por tanto, el número de observaciones, junto con el número de posibles términos del modelo con parámetros estimables, se incrementan rápidamente a medida que aumenta el número k de factores.

Así pues, hay que valorar, en función del coste del experimento, si para ajustar un modelo de primer orden es necesario llevar a cabo las 2^k combinaciones, o si es más conveniente omitir algunas utilizando únicamente un subconjunto de los puntos de un diseño factorial 2^k . Se puede considerar en este último caso una fracción 2^{-m} de un diseño 2^k que consiste en 2^{k-m} tratamientos ($k \geq m$), siempre y cuando el diseño resultante tenga, al menos, $k+1$ puntos, que es el número de parámetros que han de estimarse y mantenga las mismas propiedades que las del factorial completo, en particular, sea ortogonal.

4.3.4. DISEÑOS DE SEGUNDO ORDEN

Los diseños utilizados para recoger observaciones que permitan estimar los parámetros de los modelos de segundo orden se denominan diseños de segundo orden. Éstos deben tener, al menos, $(k+1)(k+2)/2$ puntos, que es precisamente el número de coeficientes del modelo que se necesita estimar y deben involucrar, como mínimo 3 factores, dado que el modelo contiene términos cuadráticos puros. Por otro lado, sería conveniente, por las razones que se han comentado, que fueran ortogonales y/o invariantes por rotación. Así pues, se van a considerar los diseños factoriales 3^k , que son ortogonales, pero no invariantes por rotación, y los diseños compuestos centrales, que verifican ambas propiedades.

4.3.5. DISEÑOS FACTORIALES 3^k

En los diseños factoriales 3^k cada uno de los k factores presenta 3 niveles, de manera que el número de observaciones experimentales es $N = 3^k$. Este número puede hacerse excesivamente grande, especialmente cuando se están estudiando muchos factores, de manera que en ocasiones conviene más considerar diseños fraccionales 3^{k-m} de los diseños factoriales 3^k , tal y como se hizo para los diseños factoriales 2^k .



Los diseños 3^k y sus fracciones presentan el inconveniente de que, aunque son ortogonales, no son invariantes por rotación, lo que hace que no sean muy buena elección como diseños de superficies de respuesta de segundo orden.

4.3.6. DISEÑOS COMPUESTOS CENTRALES

Los diseños compuestos centrales se presentan como una alternativa a los diseños factoriales 3^k .

Un diseño compuesto central consiste en:

1. parte factorial: un diseño factorial 2^k , completo o fraccional, en el que los niveles están codificados en la forma habitual como ± 1 ,
2. n_0 (≥ 1) puntos centrales,
3. parte axial: dos puntos axiales en los ejes correspondientes a cada uno de los factores, situados a una distancia α del centro del diseño de manera que el número total de puntos del diseño es $N = 3^k + 2^k + n_0$.

En principio, los diseños compuestos centrales así definidos no tienen por qué ser ni ortogonales ni invariantes por rotación. Se convierten en invariantes por rotación mediante una elección adecuada del valor de α , que debe depender del número de puntos de la parte factorial del diseño para conseguirlo. Por otro lado, a través de una elección apropiada de n_0 el diseño puede hacerse ortogonal o incluso de precisión uniforme (diseño que verifica que $\text{Var}(\hat{Y})$ en el origen es la misma que en un punto a una distancia unitaria del origen), que permite mayor protección que un diseño ortogonal contra el sesgo de los coeficientes de regresión producido por la presencia de términos de orden mayor que 2 en la superficie real. Se muestra a continuación la tabla 6 con los valores que deben tomar α y n_0 .

Tabla 6: Valores que deben tomar α y n_0

k	2	3	4	5	5	6	6	7	8
					1/2 rep		1/2 rep.	1/2 rep.	1/2 rep.
Puntos factoriales	4	8	1 6	32	16	64	32	64	128
Puntos axiales	4	6	8	10	10	12	12	14	16
DISEÑO ORTOGONAL									
n_0	8	9	1 2	17	10	24	15	22	33
N	16	23	3 6	59	36	100	59	100	177
DISEÑO DE PRECISION UNIFORME									
n_0	5	6	7	10	6	15	9	14	20
N	13	20	3 1	52	32	91	53	93	164
α	141 4	168 2	2	237 8	2	282 8	237 8	282 8	336 4

Una propiedad muy interesante de los diseños centrales compuestos es que se pueden construir a partir de un diseño de primer orden (el 2^k) sin más que agregar los puntos axiales y quizá algunos puntos centrales.

Por todas las propiedades que verifican, los diseños compuestos centrales son posiblemente los más utilizados para ajustar superficies de respuesta de segundo orden.



4.4. ALGUNAS CONSIDERACIONES FINALES

4.4.1. BLOQUES

En los diseños de superficies de respuesta es frecuente que, por diversas causas, se haga necesaria la utilización de bloques para asegurar la homogeneidad de las condiciones de trabajo. Por ejemplo:

si se ha de trabajar con varias remesas de material, diferentes entre sí por cuestiones de composición, procedencia u otras características cualesquiera, resulta conveniente hacer bloques para asegurar la homogeneidad del material,

cuando se construye un diseño de segundo orden a partir de uno de primer orden, puede ocurrir que las condiciones de trabajo se vean modificadas durante el tiempo que transcurre entre la ejecución de los experimentos iniciales y la ejecución de los experimentos complementarios, lo que hace necesaria la formación de bloques,

si el número de factores es tan elevado como para necesitar que una gran cantidad de observaciones se lleven a cabo bajo las mismas condiciones y esto no es posible, la creación de bloques garantiza la homogeneidad de las condiciones de trabajo.

4.4.2. EXPERIMENTOS DE MEZCLA

Los desarrollos acerca de la RSM que se han llevado a cabo en los epígrafes anteriores se han hecho bajo la suposición de que los niveles de cada factor son independientes de los niveles de los demás factores. Sin embargo, puede ocurrir que esto no sea así, como es el caso de los experimentos de mezcla, en los que los factores son ingredientes de una mezcla y sus niveles no son independientes. En este caso, se supone que la variable respuesta depende únicamente de las proporciones relativas de los componentes presentes en la mezcla.



En los experimentos de mezcla, el propósito del programa experimental es modelar la superficie a través de una función que permita, por un lado, determinar empíricamente los valores esperados de la variable respuesta para alguna combinación de ingredientes y, por otro, obtener alguna medida de la influencia de cada componente sobre la variable respuesta, tanto por separado como en combinación con los otros ingredientes.

4.4.3. EVOP

En muchas ocasiones puede resultar inviable, por diversas razones, llevar a cabo los procedimientos experimentales de la RSM en procesos de producción a gran escala. En estos casos es frecuente que la RSM se aplique a operaciones en plantas piloto, para posteriormente extrapolar las conclusiones obtenidas a los procesos a escala normal. El problema que plantean estos procedimientos es que el paso del entorno de trabajo de la planta piloto al real puede llevar aparejada una distorsión en las condiciones óptimas, pues aunque la planta a escala normal comienza su operación con niveles óptimos, generalmente se desvía de estos niveles como consecuencia de la variación en las condiciones del entorno de trabajo. El objetivo en estos casos es hacer un seguimiento del proceso en su escala normal que permita ir redirigiendo las condiciones de operación hacia el óptimo o, en todo caso, permita hacer un seguimiento de las desviaciones que aparezcan. Con este fin se emplean los métodos de operación evolutiva o EVOP, que consisten en introducir sistemáticamente pequeños cambios en los niveles de los factores de tal manera que no se provoquen alteraciones importantes en el rendimiento, calidad o cantidad, pero que permitan la detección de potenciales mejoras en el desempeño del proceso. Para llevarlas a cabo se emplean, en general, diseños factoriales 3^k .



4.5. EXPERIMENTOS CON MEZCLA

Los desarrollos acerca de la RSM que se han llevado a cabo en los epígrafes anteriores se han hecho bajo la suposición de que los niveles de cada factor son independientes de los niveles de los demás factores. Sin embargo, puede ocurrir que esto no sea así, como es el caso de los experimentos de mezcla, en los que los factores son ingredientes de una mezcla y sus niveles no son independientes. En este caso, se supone que la variable respuesta depende únicamente de las proporciones relativas de los componentes presentes en la mezcla.

En los experimentos de mezcla, el propósito del programa experimental es modelar la superficie a través de una función que permita, por un lado, determinar empíricamente los valores esperados de la variable respuesta para alguna combinación de ingredientes y, por otro, obtener alguna medida de la influencia de cada componente sobre la variable respuesta, tanto por separado como en combinación con los otros ingredientes.

4.5.1. LOS NIVELES DE LOS FACTORES SON LAS PROPORCIONES DE LOS INGREDIENTES

La variación en las proporciones de los ingredientes de las mezclas puede afectar las propiedades del producto final. Más que en las cantidades totales de los factores, las investigaciones de experimentos con mezclas se concentran en la relación de la variable de respuesta medida con las proporciones relativas de cada ingrediente presente en el producto.

Si x_1, x_2, \dots, x_k son las variables que representan las proporciones de los k ingredientes o componentes de la mezcla, los valores de las x_i están restringidos de manera que:

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (20)$$

Y la suma de las proporciones de los k ingredientes en la mezcla es la unidad, como se expresa en la ecuación 21.

$$\sum_{i=1}^k x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_k = 1 \quad (21)$$

Si la proporción de un ingrediente es $x_i = 1$, entonces no hay otros ingredientes presentes en la mezcla y el producto es una mezcla pura o de un componente.

4.5.2. DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO DE LOS FACTORES CON UN SISTEMA DE COORDENADAS SÍMPLEX

Los valores coordenados para un diseño de mezcla con tres componentes son los valores encontrados en el plano definitivo por $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ en la figura 17. La descripción geométrica del espacio de los factores para k componentes es la de un Símplex en $(k - 1)$ dimensiones. En la figura 17 se muestra el sistema Símplex de dos dimensiones para una mezcla de tres componentes como un triángulo equilátero.

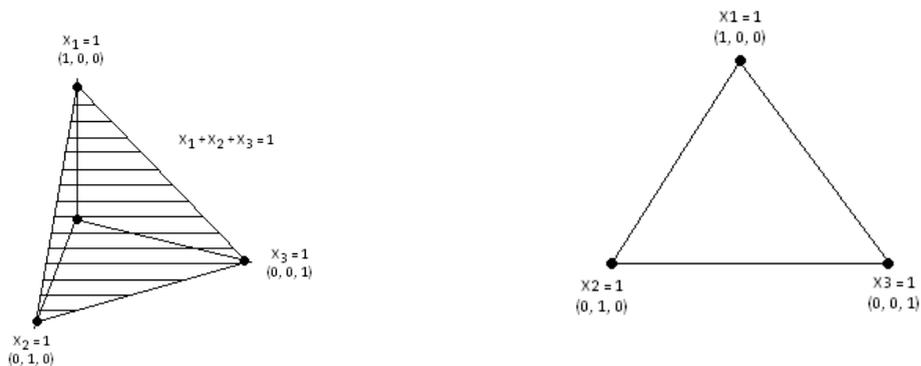


Figura 17: Espacio de un sistema símplex

Los vértices del triángulo representan mezclas de componentes sencillas con $x_i = 1$ y las demás igual a 0. Los lados del triángulo representan las coordenadas del diseño para mezclas de dos componentes con una $x_i = 0$. Las coordenadas del diseño en el interior del triángulo representan mezclas de tres componentes

con $x_1 > 0, x_2 > 0$ y $x_3 > 0$. Cualquier combinación de proporciones de componentes para un experimento de mezcla debe estar en la frontera o dentro del triángulo de coordenadas de la figura 17.

Los ejes de las variables x_i en el sistema Símplex de tres variables se muestran en la figura 18. El eje para la componente i es la recta que va del punto base $x_i = 0$ y $x_j = 1/(k-1)$ para las componentes de, $j \neq i$ al vértice, donde $x_i = 1$ y $x_j = 0$ para $j \neq i$ al vértice, donde $x_i = 1$ y $x_j = 0$ para $j \neq i$.

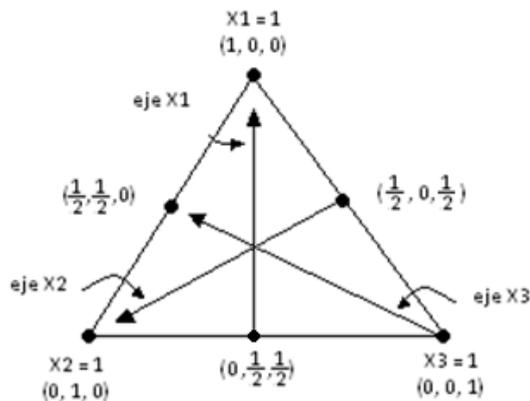


Figura 18: Ejes de las variables en el sistema Símplex de 3 variables

4.6. DISEÑO DE TRATAMIENTOS PARA MEZCLAS

4.6.1. DISEÑOS DE RETÍCULA SÍMPLEX

El arreglo formado por una distribución uniforme de coordenadas de diseño en un sistema símplex se conoce como *retícula*; vea figura 18 los diseños de retícula símplex se componen de una mal de coordenadas de diseño construidas de manera que permiten estimar las ecuaciones polinomiales de la superficie de respuesta.

La designación $\{k, m\}$ se usa en un diseño de retícula símplex con k componentes para estimar una ecuación polinomial de superficie de respuesta de grado m .



4.6.2. DISEÑOS SÍMPLEX CON CENTROIDES

El diseño símplex con centroide es un diseño en el sistema de coordenadas símplex que se compone de mezclas que contienen 1, 2, 3,... o k componentes en proporciones iguales. En consecuencia, existen k mezclas de una componente, todas las mezclas posibles de dos componentes con proporción $\frac{1}{2}$ para cada una, todas las mezclas posibles de tres componentes con proporción $\frac{1}{3}$ para cada una, etcétera, hasta una mezcla de k componentes con proporción de $\frac{1}{k}$. En la tabla 8 se comparan las mezclas para los diseños de retícula símplex con centroides con las mezclas para los diseños de retícula símplex de $\{3,2\}$ y $\{3,3\}$.

4.6.3. DISEÑO SÍMPLEX CON CENTROIDES AMPLIADO

Las combinaciones de la mezcla para diseños de retícula simples y símplex con centroides se encuentran en las orillas del espacio de factores símplex con la excepción de un punto centroide que contiene la mezcla de todas las componentes. Es posible obtener mezclas más complejas si se aumentan los diseños centroides símplex con mezclas sobre los ejes del espacio de factores.

Los puntos del diseño se colocan en cada eje, equidistantes al centro o centroide, hacia los vértices. Un diseño de k componentes tendrá k puntos de diseño adicionales, indicados en la tabla 7, con coordenadas:

Tabla 7: Diseño simplex de k componentes

x_1	x_2	...	x_k
$\frac{(k+1)}{2k}$	$\frac{1}{2k}$...	$\frac{1}{2k}$
$\frac{1}{2k}$	$\frac{(k+1)}{2k}$...	$\frac{1}{2k}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\frac{1}{2k}$	$\frac{1}{2k}$...	$\frac{(k+1)}{2k}$

Los puntos axiales adicionales proporcionarán una mejor distribución de la información a lo largo de la zona del experimento. Los tres puntos de diseño adicionales necesarios al aumentar el diseño simplex con centroides para tres componentes son $(\frac{4}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$, $(\frac{1}{6}, \frac{4}{6}, \frac{1}{6})$ y $(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{4}{6})$. El diseño completo se describe en la figura 19.

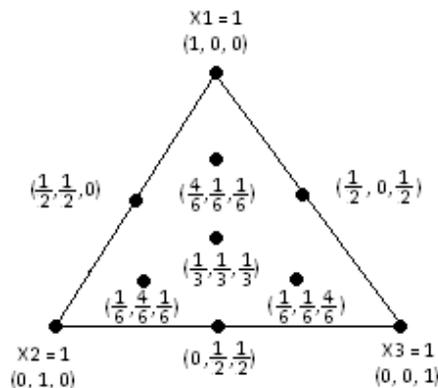


Figura 19: Diseño Simplex con Centroide ampliado para un experimento de mezcla con 3 componentes

Tabla 8: Diseño de retícula simplex y un diseño simplex con centroides para una mezcla con tres componentes

{3, 2} Retícula			{3, 3} Retícula			Centroide		
X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3
1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	0	1
1/2	1/2	0	2/3	1/3	0	1/2	1/2	0
1/2	0	1/2	2/3	0	1/3	1/2	0	1/2
0	1/2	1/2	0	2/3	1/3	0	1/2	1/2
			1/3	2/3	0	1/3	1/3	1/3
			1/3	0	2/3			
			0	1/3	2/3			
			1/3	1/3	1/3			

4.6.4. PSEUDOCOMPONENTES PARA INGREDIENTES CON COTAS INFERIORES

Muchas mezclas requieren que todos los componentes estén presentes al menos en una proporción mínima. Es claro que el concreto requiere proporciones de las componentes imponen la restricción de la ecuación 22:

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq 1 \quad (22)$$

Sobre las proporciones. Suponga que las cotas inferiores para cemento (x_1), agua (x_2) y arena (x_3) son:

$$0.10 \leq x_1 \quad 0.20 \leq x_2 \quad 0.30 \leq x_3 \quad (23)$$

Y se usará un diseño de retícula simplex $\{3,2\}$ en el experimento. Las cotas inferiores sobre las proporciones de los componentes limitan el diseño a una subregión del espacio de factores original mostrado en la figura 18 y la tabla 8.

Para simplificar la construcción de las coordenadas del diseño, se construye un conjunto de pseudocomponentes codificando las variables de las componentes originales en un sistema de coordenadas símplex para las variables de las pseudocomponentes \tilde{x}_i , con restricciones $0 \leq \tilde{x}_i \leq 1$. Si la cota inferior de la componente i es L_i y $L = \sum L_i$, entonces la pseudocomponente se calcula como se define en la ecuación 24:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - L_i}{1 - L} \quad (24)$$

Es posible construir un diseño con las componentes originales basado en las coordenadas de las pseudocomponentes que se establece en un símplex normal con $\sum \tilde{x}_i = 1$. Las proporciones de los componentes originales necesarios para las mezclas en el experimento se pueden derivar mediante la ecuación 25, la transformación inversa:

$$x_i = L_i + \tilde{x}_i(1 - L) \quad (25)$$

4.7. ANALISIS DE EXPERIMENTOS CON MEZCLA

4.7.1. POLINOMIOS CANÓNICOS PARA APROXIMAR SUPERFICIES

La forma general de la función polinomial usada para aproximar la superficie de respuesta lineal es la ecuación 26:

$$\mu_y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (26)$$

La restricción sobre las componentes de la mezcla $x_1 + x_2 + \dots + x_k = 1$ crea una dependencia entre las x_i en la función lineal. Multiplicar β_0 por $(x_1 + x_2 + \dots + x_k)$ proporciona una nueva expresión del modelo como la ecuación 27:

$$\mu_i = \beta_0 \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i = \beta_1^* x_1 + \beta_2^* x_2 + \dots + \beta_k^* x_k \quad (27)$$

Donde $\beta_i^* = \beta_0 + \beta_i$, $i = 1, 2, \dots, k$. La nueva expresión de la ecuación con parámetros β_i^* se conoce como polinomio canónico. El polinomio canónico y el polinomio original son equivalentes porque uno se deriva del otro y el grado del polinomio y el número de componentes no cambian con la nueva expresión.

La función polinomial cuadrática usada para aproximar la superficie de respuesta es la ecuación 28:

$$\mu_y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum b_{ij} x_i x_j \quad (28)$$

El polinomio canónico cuadrático producido al incluir la restricción $\sum x_i = 1$ es la ecuación 29:

$$\mu_y = \sum_{i=1}^k \beta_i^* x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij}^* x_i x_j \quad (29)$$

Donde $\beta_i^* = \beta_0 + \beta_i + \beta_{ii}$, y $\beta_{ij}^* = \beta_{ij} - \beta_{ii} - \beta_{jj}$. Los nuevos parámetros del polinomio canónico cuadrático para los tres componentes de la mezcla expresados en términos de los parámetros del polinomio original son:

$$\begin{aligned} \beta_1^* &= \beta_0 + \beta_1 + \beta_{11} & \beta_2^* &= \beta_0 + \beta_2 + \beta_{22} & \beta_3^* &= \beta_0 + \beta_3 + \beta_{33} \\ \beta_{12}^* &= \beta_{12} - \beta_{11} - \beta_{22} \\ \beta_{13}^* &= \beta_{13} - \beta_{11} - \beta_{33} \\ \beta_{23}^* &= \beta_{23} - \beta_{22} - \beta_{33} \end{aligned} \quad (30)$$



4.7.2. ESTIMACIÓN DEL MODELO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA POLINOMIAL CANÓNICO CUADRÁTICO

Por convenio se eliminará al asterisco de los coeficientes en las ecuaciones polinomiales canónicas. El modelo completo polinomial canónico para el experimento de mezcla de gasolina es:

$$y_{ij} = \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \beta_3 x_{3j} + \beta_{12} x_{1j} x_{2j} + \beta_{13} x_{1j} x_{3j} + \beta_{23} x_{2j} x_{3j} + e_{ij}$$
$$i = 1, 2, \dots, t \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (31)$$

Donde se supone que los errores experimentales e_{ij} son independientes, con distribución normal, con media 0 y varianza σ^2 . Además, $t = 7$ tratamientos de mezcla y $r = 2$ replicas de cada una para el total de $N = rt = 14$ observaciones.

En principio, la hipótesis significativa es si la respuesta depende de los componentes de la mezcla, de acuerdo con el modelo cuadrático. Cuando la hipótesis nula es verdadera, el modelo reducido.



CAMPAÑA EXPERIMENTAL

5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

5.1. MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

El material y equipamiento que se enumera a continuación, es el necesario para poder realizar de forma correcta y eficiente los ensayos que se han llevado a cabo en este proyecto, y que se describe en el apartado 2 de este capítulo (5.2).

5.1.1. PROBETA

Recipiente cilíndrico utilizado para depositar las mezclas de áridos. La probeta está compuesta de dos partes, cuerpo y cabecero, el cabecero se extrae para refrentar la mezcla.



Figura 20: Probeta

5.1.2. BÁSCULA DE PRECISIÓN

Instrumento de medida de masa utilizado durante el ensayo para saber el peso de la dosificación, y así averiguar su densidad.



Figura 21: Peso

5.1.3. COMPACTADORA AUTOMÁTICA DE MORTEROS C0100

Compactador automático para probetas de 40 x 40 x 160 mm. Sistema de fijación para facilitar la rápida maniobra de colocar y retirar el molde. Se suministra completo con preselector automático y visualizador digital del número de golpes, pulsador de emergencia y cable de conexión.

Alimentación: 1 x 220/240 V. 50 Hz.

Dimensiones: 980 x 280 x 400 mm.

Peso: 60 kg.



Figura 22: Compactadora automática de morteros

5.1.4. CAPAZOS

Recipiente de plástico utilizado para depositar los áridos y proceder a la producción de las dosificaciones adecuadas.



Figura 23: Capazo

5.1.5. REGLE

Instrumento metálico de poco espesor y gran longitud utilizado para refrentar, alisar, la superficie de la probeta.



Figura 24: Regle

5.1.6. BANDEJA METALICA

Recipiente metálico rectangular sobre el cual se coloca la probeta durante el refrentado, como se muestra en la figura 24, para no perder los residuos producidos durante el proceso de refrentado.

5.1.7. TAMIZ

Instrumento utilizado para separar áridos, al retener áridos de tamaños superiores al hueco de su malla. Se ha utilizado en este ensaño para ver el peso de los áridos sobrantes al refrentar, y así averiguar el porcentaje exacto de la mezcla en la probeta.



Figura 25: Tamices (Fuente: todoedificacion.blogspot.com)

5.2. METODO ENSAYO

Antes de realizar el procedimiento experimental, hay que saber que se tiene que ensayar. Para ello hay que disponer un listado de ensayos a realizar, elegidos minuciosamente para obtener el mejor resultado posible de los ensayos.

Con la elección de dosificaciones a utilizar, se procede a la realización del método de ensayo. Previamente, es obligatorio ponerse primero el equipamiento necesario de seguridad.

A continuación, una vez equipado, y con los ensayos a realizar elegidos, se procede a entrar al laboratorio. Colocar un capazo en el peso y depositar en él, la cantidad de árido de cada granulometría que se requiere, establecida en la tabla realizada antes de entrar al laboratorio, hasta tener la mezcla con la dosificación deseada.

Para el vertido del árido primeramente hay que tarar el peso con un capazo vacío, para que solo muestre la cantidad de áridos vertidos, sin que tenga en cuenta el peso del capazo. Una vez



vertida la cantidad de un tipo de árido deseado, volver a tarar. A continuación, se ha de introducir la cantidad de árido de la segunda granulometría que se desee, si la mezcla requiere dos granulometrías. Repetir el proceso si la mezcla requiere tres granulometrías.

Una vez obtenida la dosificación deseada en el capazo. Quitar del peso, y mezclar manualmente los áridos vertidos en el capazo. Mezclar manualmente hasta conseguir que la mezcla sea homogénea.

Tras tener la mezcla homogeneizada, verter la mezcla en la probeta con su respectivo cabecero. Posteriormente, colocar la probeta sobre el compactador automático de morteros. Programar la máquina de golpes para realizar 125 reiteraciones. Cantidad de golpes elegida con la cual se considera bien vibrada la mezcla, y homogeneizada la mezcla, sin llegar a segregar.

Una vez finalizados los 125 golpes, quitar la probeta de la máquina de golpes, y depositarla sobre una bandeja metálica, puesta para no perder los restos de áridos caídos al refrentar la mezcla. Quitar el cabezal de la probeta, y refrentar la mezcla hasta enrasarla con el cuello de la probeta.

Una vez refrentada la mezcla en la probeta, limpiar el recipiente para que no queden áridos en las paredes de la probeta que pueda variar el peso de esta. Una vez limpia la probeta, colocarla sobre el peso debidamente tarada. Apuntar el peso resultante, pues este es el objetivo de todo.

A continuación, los restos derramados sobre la bandeja metálica, al refrentarse la mezcla de la probeta, se tamizan para dividirlos y separar los tres tipos de áridos diferentes como en su estado inicial. Tras tamizarlos colocar un capazo sobre el peso, y tarar. Depositar sobre el capazo uno de los tipos de áridos y apuntar el peso resultante. Tras anotar, verter uno de los dos tipos de áridos que quedan por pesar, y anotar el resultado obtenido. Repetir el procedimiento con el último tipo de árido que queda. Calcular los restos de los áridos que no han entrado dentro de la probeta para saber la dosificación real del recipiente. Sabiendo la cantidad de



árido que se ha usado y la cantidad de árido que ha sobrado, se puede saber la cantidad de árido que hay dentro de la probeta.

Esto se realiza para tener mayor precisión en los resultados obtenidos posteriormente con un software de estadística, el cual pide unos datos de entrada, dosificaciones de áridos, y una salida, peso. Por lo tanto, cuanto más se ajusten las dosificaciones, mas "real" es el resultado.

Una vez realizado el método de ensayo. Trasladar los datos obtenidos al programa informático que se utilizará. Este programa una vez introducidas las variables (dosificaciones de los tipos de áridos) y el resultado (peso de la mezcla), obtiene una ecuación capaz de predecir futuras mezclas con un 95% de acierto y la dosificación que es capaz de realizar el mayor resultado posible. Esto significa que es capaz de obtener el mayor peso posible para la probeta, es decir, optimizar la mezcla. Objetivo de toda esta investigación.



ANALISIS DE LOS RESULTADOS



6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

Dada la gran cantidad de áridos que se utilizan en la construcción para la creación de hormigones, es lógico estudiar la forma de ahorrar la cantidad de áridos a utilizar, y que estos aporten la mayor compacidad posible, ya que aumentando la compacidad se aumenta la calidad del hormigón, aumentando su resistencia, durabilidad y además, un ahorro de agua en la producción de hormigón.

Los resultados obtenidos a partir de investigaciones anteriores demuestran la influencia adversa de los áridos con forma y tamaño inadecuados. Esta influencia se manifiesta en el alto porcentaje de vacíos del hormigón y sus consecuencias en la reducción de la resistencia a la compresión, en el aumento del consumo de cemento y en la baja durabilidad del mismo.

Con este estudio se pretende encontrar la máxima compacidad de los áridos, aportando al hormigón mayor durabilidad y mayor resistencia entre otras mejoras, como trabajabilidad, economía, porosidad, futura contracción del hormigón, derivadas de la mejora obtenida gracias al aumento de la compacidad. Mediante la metodología de superficie de respuesta, se es capaz de obtener la máxima compacidad posible, de una mezcla de áridos, realizando una cantidad de ensayos relativamente pequeña y representativa.

El objetivo es encontrar la óptima dosificación posible a realizar con los tres tipos de áridos utilizados en los ensayos.



6.2. MÉTODO DE ENSAYO

Se ha utilizado como base de la realización de los ensayos el método "ASTM C 29/C 29M - 97". Este método permite determinar la densidad aparente (peso unitario) de un árido, tanto en su condición compactada como suelta, y calcular los huecos entre las partículas en los áridos finos, gruesos o mezclas. Este método solo se aplica en áridos que no excedan los 125mm de tamaño máximo nominal.

El método "ASTM C 29/C 29M - 97" permite diversos tipos de procedimientos, tanto por apisonado, asentado y suelto. Se ha elegido para la realización de este método de ensayo, el procedimiento por asentado, pero con algunas variantes. El método "ASTM C 29/C 29M - 97" llena el recipiente en 3 capas iguales. Compacta cada capa, colocando el recipiente en una base firme. Levantando alternativamente cada uno de los lados 50 mm y dejándolo caer con un golpe seco. Deja caer 50 veces, el recipiente, cada capa. Una vez realizado, nivela el recipiente con una regla.

En este método de ensayo se ha variado en número de capas y el número de golpes. Se realiza el método con una sola capa, y se efectúan 125 golpes. Una vez realizado se nivela con un regle, de igual modo que el método "ASTM C 29/C 29M - 97" y finalmente se pesa.

6.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El objeto de este estudio es encontrar la máxima compacidad a través de la optimización de la dosificación de los áridos.



6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de ensayo utilizado se basa en el método "ASTM C 29/C 29M – 97", por diversas razones se han modificado algunos aspectos. Las variaciones en el método se han realizado para mejorar los resultados tras un largo estudio.

Se realizaron 16 experimentos. Utilizando como base para la obtención de un modelo representativo de muestras. Una vez obtenido se analizó con el programa informático "Minitab". Minitab es un programa estadístico capaz de obtener una ecuación representativa de la realidad tras aportarle los suficientes datos. El programa realiza múltiples pruebas hasta obtener los coeficientes adecuados necesarios.

Tras tener los 16 experimentos hechos y obtenidos los resultados, se realizaron 6 experimentos mas para comprobar cuál de los diversos métodos de dosificación ajustaba más la predicción. Y una vez elegido el método que menos porcentaje de errores tuviese, con ese, se calcula la máxima optimización posible de la mezcla de tres áridos utilizados

A continuación se muestra en la tabla 9 las dosificaciones de los 16 ensayos realizados como base del experimento para poder realizar posteriormente la optimización de la mezcla y la predicción de la compacidad de futuras dosificaciones sin tener que llegar a realizarlas, lo que ahorraría mucho tiempo, trabajo, material y dinero.

Tabla 9: Dosificaciones de los 16 experimentos

Nº Experimento	0-4	6-12	12-20
1	0,00%	50,81%	49,19%
2	51,25%	0,00%	48,75%
3	0,00%	0,00%	100,00%
4	49,82%	50,18%	0,00%
5	20,23%	64,28%	15,48%
6	100,00%	0,00%	0,00%
7	0,00%	100,00%	0,00%
8	30,53%	33,59%	35,88%
9	15,32%	16,12%	68,55%
10	69,64%	14,37%	15,99%
11	34,31%	0,00%	65,69%
12	65,44%	34,56%	0,00%
13	37,71%	62,29%	0,00%
14	0,00%	35,83%	64,17%
15	0,00%	82,18%	17,82%
16	66,00%	0,00%	34,00%

Estos experimentos no han sido fruto de su elección al azar, sino que son puntos representativos, y entre todos abarcan el gran abanico de posibles dosificaciones, entre los puntos analizados esta, el centroide (misma cantidad de porcentaje de todos los tipos de áridos), los vértices extremos (100% de solo un tipo de árido), y puntos intermedios del triangulo que representarían los 3 tipos de áridos, se puede ver también la figura 28 de las dosificaciones, mas orientativa que la tabla 9.

6.5. RESULTADOS

En la tabla 10 se muestran los 16 ensayos realizados con los resultados obtenidos (peso)

Tabla 10: Resultados de los experimentos

Nº Experimento	0-4 (%)	6-12 (%)	12-20 (%)	Peso (kg)
1	0,00	50,81	49,19	5,171
2	51,25	0,00	48,75	6,52
3	0,00	0,00	100,00	4,934
4	49,82	50,18	0,00	6,223
5	20,23	64,28	15,48	5,703
6	100,00	0,00	0,00	6,404
7	0,00	100,00	0,00	4,342
8	30,53	33,59	35,88	6,223
9	15,32	16,12	68,55	5,846
10	69,64	14,37	15,99	6,617
11	34,31	0,00	65,69	6,259
12	65,44	34,56	0,00	6,451
13	37,71	62,29	0,00	6,097
14	0,00	35,83	64,17	5,135
15	0,00	82,18	17,82	5,085
16	66,00	0,00	34,00	6,732

En la tabla 2 se aprecia como los mayores resultados de peso, se producen con un elevado % de árido del 0-4. Esto lleva a pensar que cuando se calcule la dosificación óptima de estos tres áridos, esta se producirá con una cantidad importante de áridos del 0-4.

Se ha realizado una grafica, figura 26, para mayor apreciación de que los mayores resultados son dados cuanto mayor es la cantidad de finos.

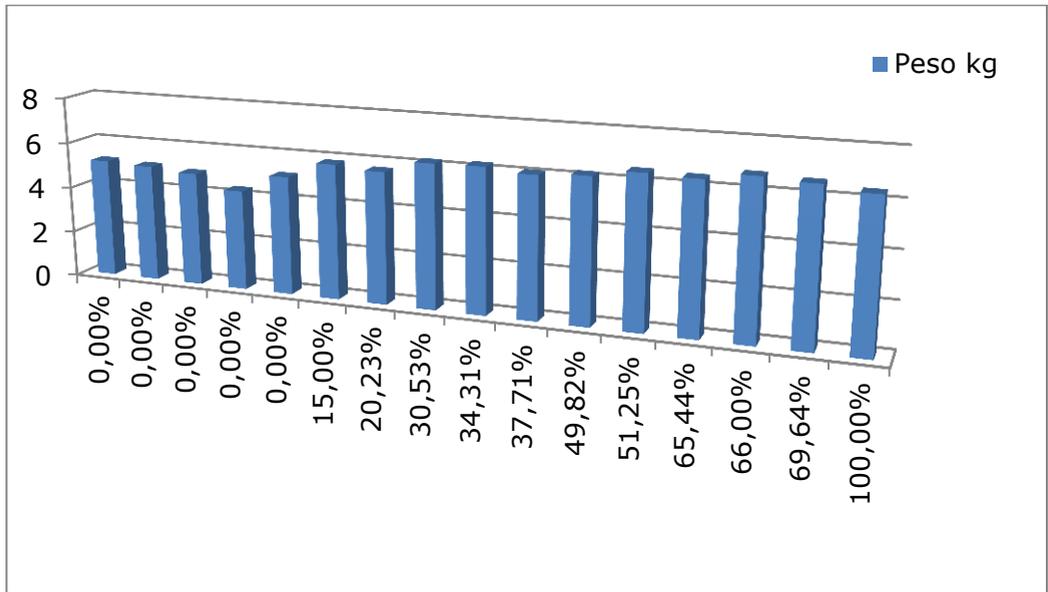


Figura 26: Relación peso - % árido 0-4

6.6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados, los mostrados en la tabla 10, se ha calculado que ecuación entre las diversas variantes dentro del método de superficie de respuestas para diseño de mezclas hacia las predicciones más ajustadas. Se ha comprobando realizando 6 experimentos mas y comprobando las predicciones con los resultados reales.

Entre los métodos disponibles a utilizar, aportados por el soporte informático utilizado, se han analizado dos métodos distintos (Cuadrático, cubico especial). Estos métodos son los que mejor ajuste realizaban. Ya que otros métodos también disponibles ajustaban de forma irreal la ecuación solución a los resultados obtenidos en los ensayos, lo cual provocaría mayor error en la predicción de futuros ensayos. Es cierto que gracias a ello la ecuación obtenida respecto a los resultados de los ensayos produce muy poco error. Pero al introducir nuevos ensayos, se

modifica la ecuación de forma significativa, dejando la ecuación anterior inutilizable. Por ello se descartan estos métodos.

Los dos métodos elegidos realizan unas ecuaciones con mayor error respecto a los resultados obtenidos en los ensayos, pero menor respecto a futuros ensayos, ya que estas ecuaciones son más representativas. La gráfica de Cox en nuestros ensayos debería realizar una parábola, porque al realizarse con dos áridos, la gráfica describe una parábola. Por ello cabe esperar, un comportamiento similar para tres áridos. Al no mostrarla, se sobre entiende que los otros métodos ajustan al exceso, a los datos reales, no a la idealización del experimento.

A continuación se muestra la figura 27, un ejemplo de una curva que ajusta de forma excesiva a los resultados obtenidos, olvidándose de que en futuros ensayos produciría mayor error que otras curvas más representativas.

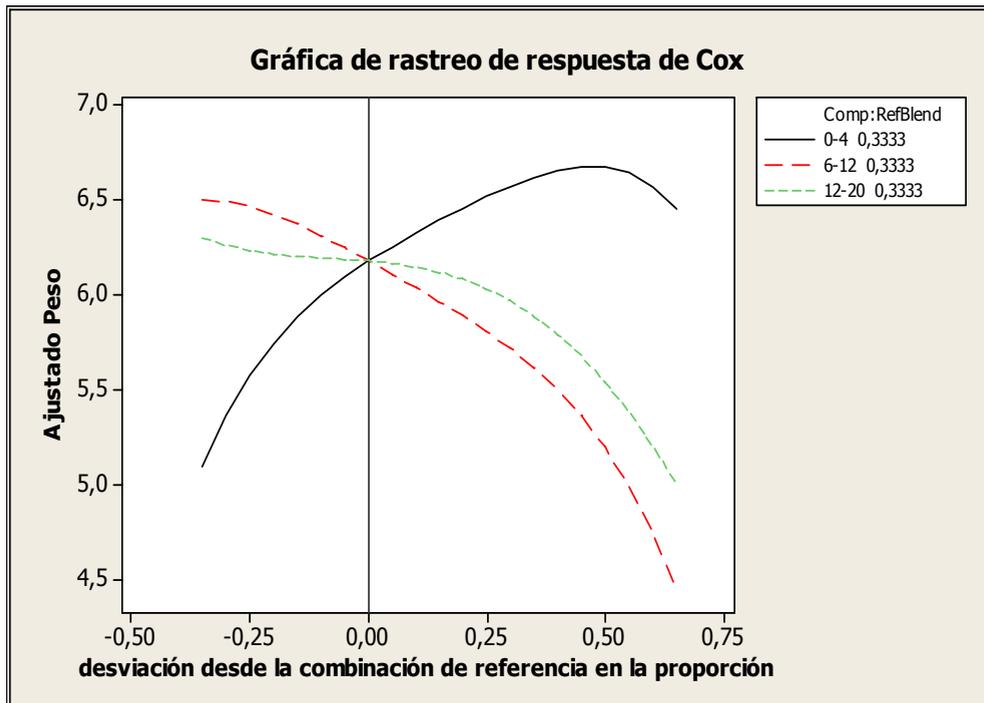


Figura 27: Ejemplo método de ajuste inadecuado.



Cuadrática

Los coeficientes que se obtienen del programa informático para la obtención de la ecuación modelo se multiplican por las variables de que se deseen. En este caso se ha nombrado de la siguiente forma:

A= % de áridos del tipo 0-4

B= % de áridos del tipo 6-12

C=% de áridos del tipo 12-20

La ecuación con los coeficientes con la cual se obtienen estas predicciones es:

$$P = 6,37*A + 4,483*B + 4,914*C + 3,408*A*B + 3,672*A*C + 2,119*B*C \text{ (kg)}$$

El resultado de la ecuación es, la predicción del peso que se obtendría, al utilizar una mezcla de áridos de 0-4, 6-12, 12-20. Introducidos con sus respectivos porcentajes en la mezcla. Tener en cuenta que el 100% de la mezcla es igual a uno. Se realiza en tanto por 1.

Ejemplo: una mezcla con un 60% de árido 0-4 un 20% de árido 6-12 y un 20% de árido 12-20 sería. El resultado de la operación sería el peso de la mezcla en kilogramos.

$$P = 6,37*0.6 + 4,483*0.2 + 4,914*0.2 + 3,408*0.6*0.2 + 3,672*0.6*0.2 + 2,119*0.2*0.2 \text{ (kg)}$$

Tabla 11: Errores del método cuadrático

	PRUEBAS	PREDICCIÓN	RESIDUOS %
1	6,655	6,63469033	0,31%
2	6,322	6,481469836	2,46%
3	6,363	6,387291142	0,38%
4	6,246	6,55945715	4,78%
5	6,567	6,616263318	0,74%
6	6,843	6,704328166	2,03%
		SUMATORIO	6,03%

Cúbico especial

La ecuación con los coeficientes con la cual se obtienen estas predicciones es:

$$P = 6,3718*A + 4,4849*B + 4,9157*C + 3,3872*A*B + 3,6505*A*C + 2,0937*B*C + 0,4459*A*B*C \text{ (kg)}$$

Tabla 12: Errores del método cubico especial

	PRUEBAS	PREDICCIÓN	RESIDUOS %
1	6,655	6,641104261	0,21%
2	6,322	6,486213507	2,53%
3	6,363	6,391111954	0,44%
4	6,246	6,568242276	4,91%
5	6,567	6,622829556	0,84%
6	6,843	6,701560305	2,07%
		SUMATORIO	6,44%

Ante los resultados obtenidos en las predicciones, se ha observado como el método de regresión cuadrático tiene un

6,03% de error en el sumatorio de los 6 experimentos realizados, mientras que el método de regresión cubica especial tiene un 6,44% de error entre los 6 experimentos realizados. Por ello se ha elegido el método de **regresión cuadrático**. Este es el método que más se aproxima a los resultados obtenidos en estos últimos 6 experimentos, será el método utilizado.

Los resultados obtenidos, tienen un error de predicción adecuado, aproximadamente tiene un margen de error del 1% por cada experimento que se realiza. Cuando en diversos ensayos se admite un 5-10% de error en la predicción.

A continuación se muestra la figura 28. En la figura 28 se pueden observar los puntos elegidos para utilizar como base del experimento.

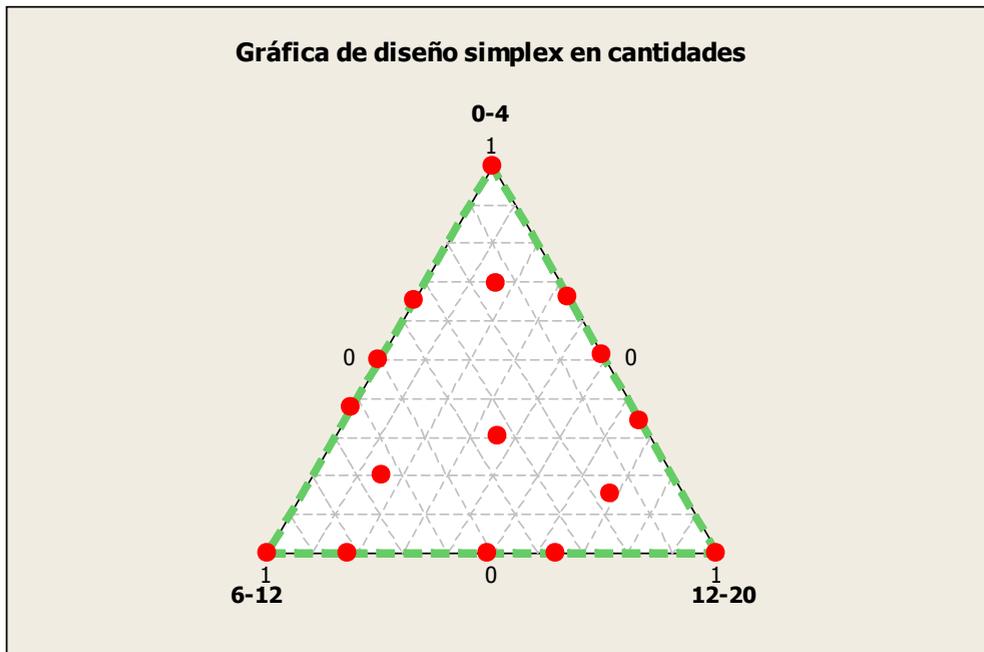


Figura 28: Gráfica de diseño simplex en cantidades

Los experimentos han sido elegidos bajo un estricto criterio. Se han seleccionando todos los vértices, puntos medios, el baricentro

(misma cantidad de todos los componentes y otros puntos distribuidos para abarcar todas las zonas), además puntos intermedios entre vértices y el punto medio, vértices y el centro, un total de 16 experimentos bien distribuidos.

Tabla 13: Coeficientes de regresión estimados para Peso (kg)

Termino	Coef.	EE del coef.	T	P	VIF
0-4	6,370	0,09576	*	*	2,731
6-12	4,483	0,08991	*	*	2,493
12-20	4,914	0,09677	*	*	2,654
0-4*6-12	3,408	0,36370	9,37	0,000	2,487
0-4*12-20	3,671	0,38225	9,60	0,000	2,656
6-12*12-20	2,119	0,39956	5,30	0,000	2,524

Tabla 14: Análisis de varianza para Peso (kg). Tabla ANOVA

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
Regresión	5	7,57072	7,57072	1,51414	137,61	0,000
Lineal	2	5,93505	2,53329	1,26664	115,12	0,000
Cuadrática	3	1,63567	1,63567	0,54522	49,55	0,000
0-4*6-12	1	0,49980	0,96614	0,96614	87,81	0,000
0-4*12-20	1	0,82638	1,01508	1,01508	92,25	0,000
6-12*12-20	1	0,30949	0,30949	0,30949	28,13	0,000
Error residual	10	0,11003	0,11003	0,01100		
Total	15	7,68075				



La tabla ANOVA (ANalysis Of VAriance) es una prueba que nos permite medir la variación de las respuestas numéricas como valores de evaluación de diferentes variables nominales.

En la tabla 14, se observa como la relación entre los áridos 0-4*6-12 y 0-4*12-20 influyen en la mezcla, mientras que la 6-12*12-20 no influye ya que el "SC Sec." es igual al "SC Ajust.", mientras que las otras dos son inferiores los "SC Sec.".

En este caso $P = 0,000$. Por tanto, hay fuertes evidencias de la existencia de interacción entre ambos factores. Cuando $P > 0.005$ entonces no hay relación.

En la figura 29, se muestra la grafica de probabilidad normal, la idea básica consiste en representar, en un mismo gráfico, los datos empíricos observados, frente a los datos que se obtendrían en una distribución normal teórica. Si la distribución de la variable es normal, los puntos quedarán cerca de una línea recta. Es frecuente observar una mayor variabilidad (separación) en los extremos, la línea azul representa la recta que se obtiene con una distribución teórica normal, los puntos rojos son los resultados de los experimentos realizados.

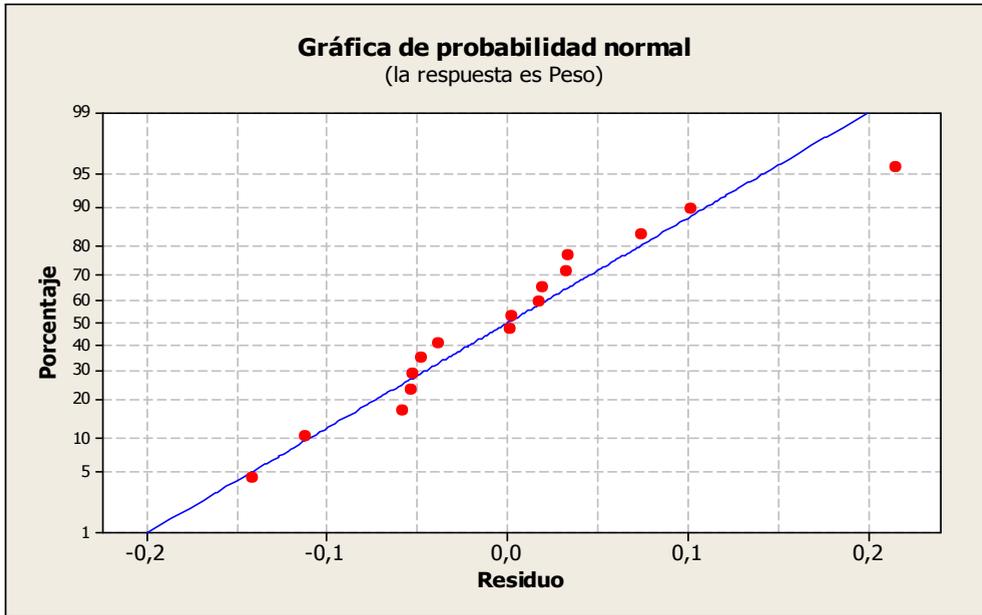


Figura 29: Gráfica de probabilidad normal

El error producido es siempre muy similar, el único que se desvía un poco más que el resto es la muestra con el 95% y un residuo del 0,2. La unión de todos los puntos representa la recta de probabilidad normal (línea azul). Los residuos como se observan no superan los 200 g. Las muestras pesaban entre 4,5 y 6,8 kg. Por ello, este residuo es ínfimo como ya se ha mencionado anteriormente.

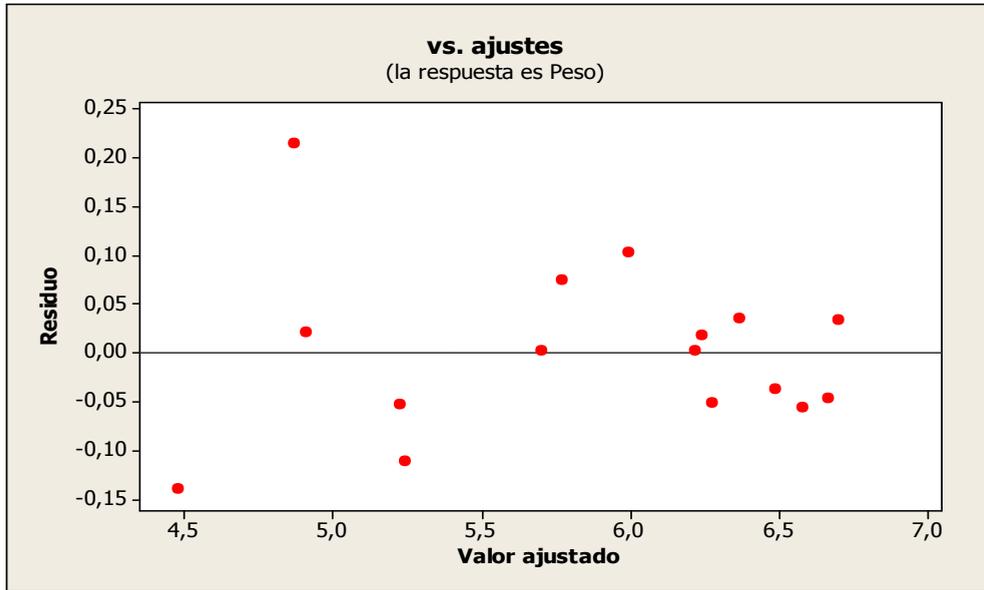


Figura 30: Gráfica de residuos vs ajustes

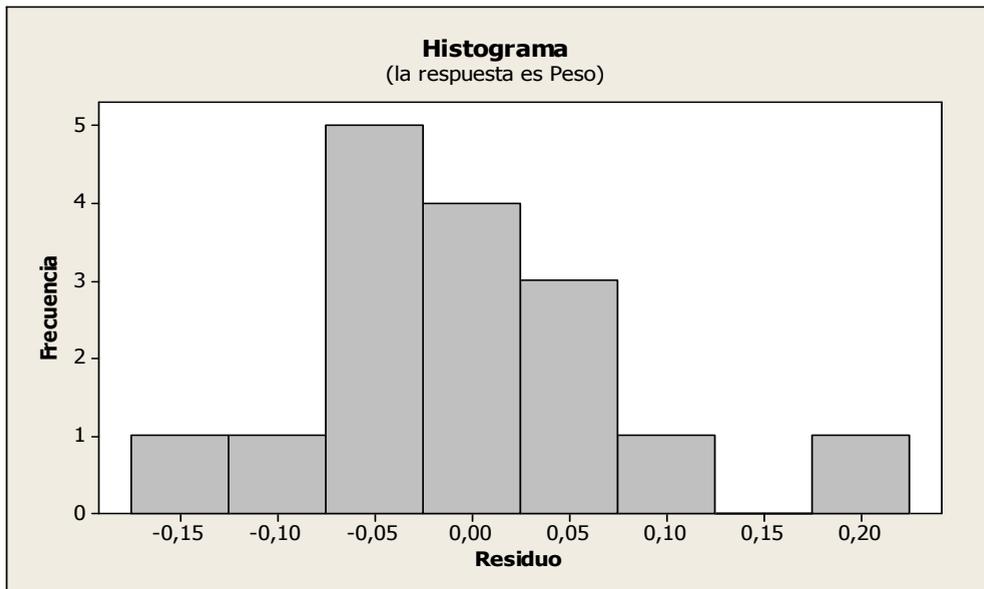


Figura 31: Histograma

Las figuras 30 y 31 representan los mismos resultados, pero con algunos matices diferentes, en la figura 30 se observa como los mayores errores son producidos en las mezclas en las que menos pesa la muestra, esto es debido a que las mezclas que están compuestas solo por áridos de 6-12 o solo del 12-20, o gran cantidad de estos, se produce una gran cantidad de huecos entre ellos, y eso produce su escasa compacidad, dando un peso ligero, pero que el residuo sea mayor que en las demás es producido porque es más complicado refrentar un árido del 6-12 y aun más el 12-20 que un árido fino como es el 0-4 debido a su gran tamaño.

En la figura 31 se muestra como la frecuencia con la que se producen errores de escaso nivel, es decir, son residuos muy pequeños, son mucho más elevadas que en la frecuencia con la que se producen residuos de grandes cantidades.

A continuación se muestra en las figuras 32, 33 y 34 pormenorizado tres graficas en las cuales se detalla los residuos obtenidos como en la grafica anterior, pero ahora respecto a cada uno de los tipos de áridos utilizados (0-4, 6-12, 12-20).

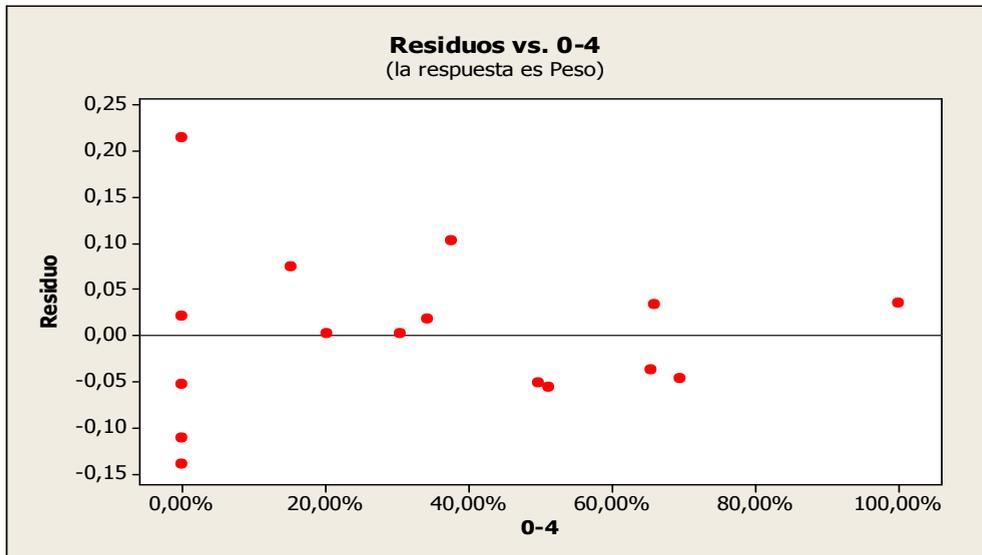


Figura 32: Residuos vs 0-4

Como se puede apreciar en la figura 32, cuando la cantidad de áridos del 0-4 se reduce, aumenta el % de error en los ensayos. Esto es debido a que cuando se hacen mezclas sin finos o con pocos finos, es muy complicado refrentarlo, y eso daña el método de ensayo.

Con porcentajes mayores del 40% se observa que los residuos no superan prácticamente los 0,05kg (5g) debido a que facilita mucho el refrentado de la probeta, lo que ayuda a ser más exactos en los resultados.

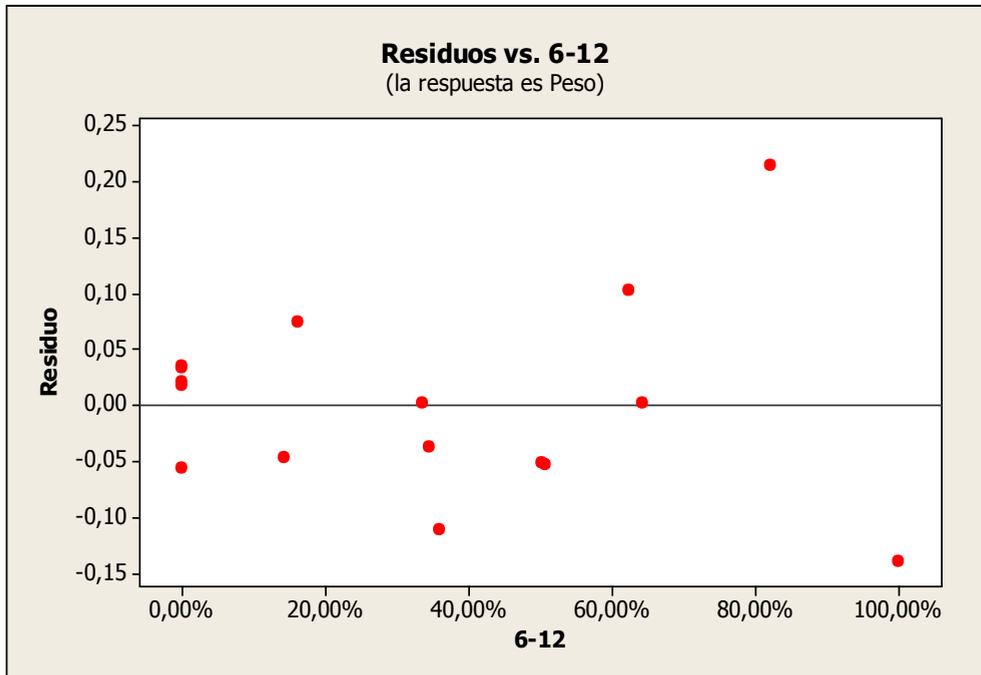


Figura 33: Residuos vs 6-12

En la figura 33 se observan las mismas conclusiones que en la figura 32, en la figura 32 se observa como al aumentar el porcentaje de los áridos del 6-12, aumentan los residuos, dado que estas quitando otros áridos, como es el 0-4, impidiendo así la realización de un refrentado correcto.

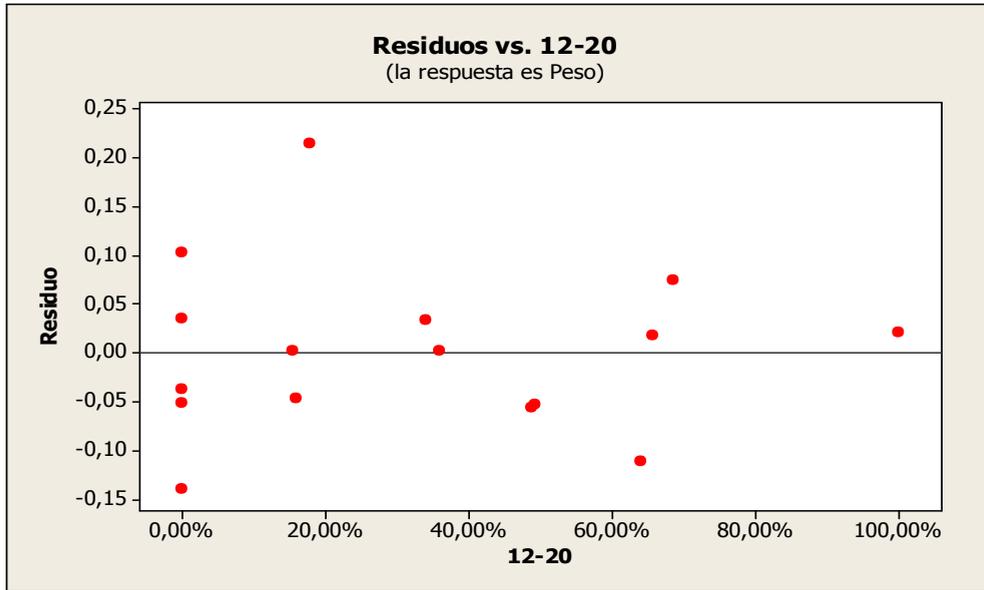


Figura 34: Residuos vs 12-20

En la figura 34, en contra de lo que se podía esperar, se han producido unos residuos más semejantes a la figura 32, que a la figura 8. En esta gráfica se esperaba un aumento de los residuos en las muestras conforme se aproximase la mezcla al 100% de áridos 12-20. En su lugar, han salido mayores residuos en las muestras con poco % de áridos de granulometría 12-20 que en % próximos al 100%.

En la figura 35 se muestra el error producido por orden de observación. Esta gráfica es una crónica de cómo se han realizado los ensayos. Informa de cuales han tenido más error. En la figura 35 se puede observar como no existe una diferencia considerable entre los errores producidos. La aleatoriedad de aparición de los picos de error, indica la correcta ejecución de los experimentos.

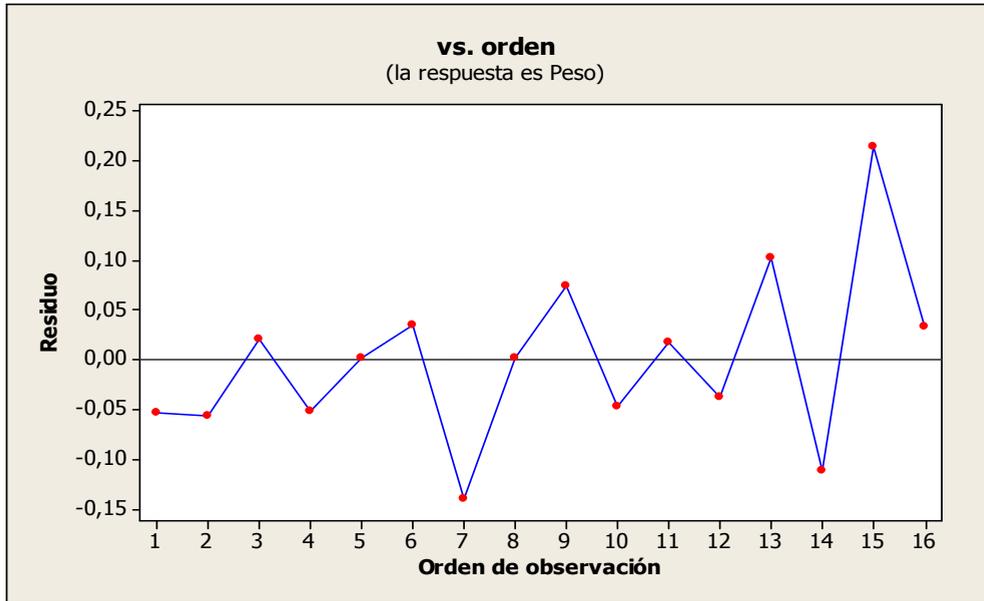


Figura 35: Residuos vs orden observación

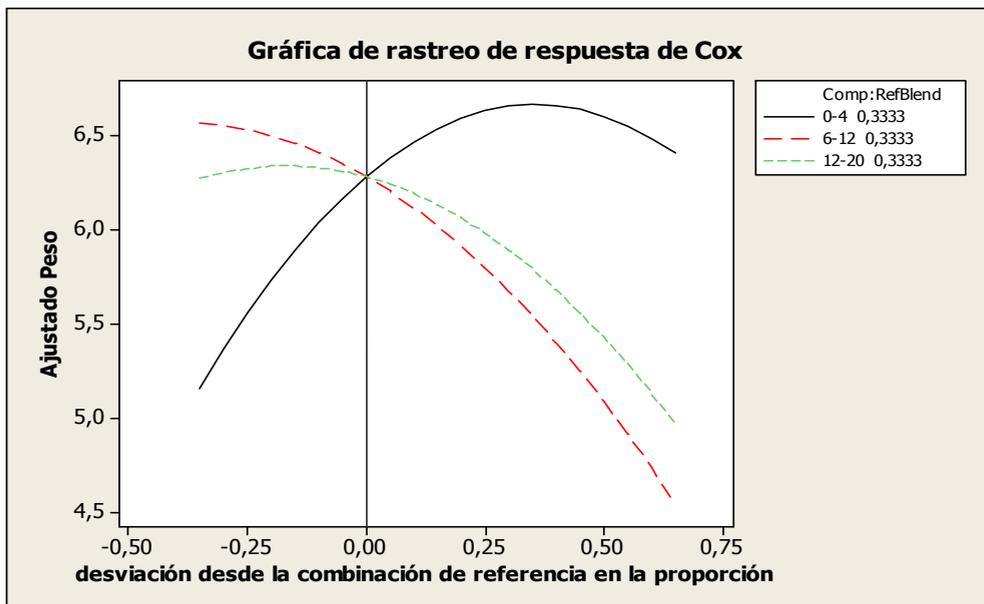


Figura 36: Gráfica de rastreo de Cox

En la figura 36 se puede apreciar cómo afecta el porcentaje de cada tipo de árido al peso de la mezcla obtenida. La combinación de referencia en la proporción 0,00 expresa que la combinación de la mezcla en ese punto es un 33% de cada tipo de árido usado (0-4, 6-12, 12-20).

Conforme avanzan los tipos de áridos hacia el 0,75 aumentan su porcentaje en la mezcla, disminuyendo en consecuencia el resto de áridos. Conforme aumenta el tipo de árido 0-4 por el eje horizontal aumenta el peso, mientras que a los áridos 6-12 y 12-20 les pasa justamente lo contrario como es lógico, debido a que para aumentar el tipo de árido 0-4 tienen que disminuir los otros dos tipos de áridos.

Se observa como la grafica acaba en el -0,33 y en el 0,66 del eje horizontal (desviación desde la combinación de referencia en la proporción) ya que al considerar que el 0,0 era un 33% de cada tipo de árido, nunca se podrá aumentar más de un 100% de cada árido o tener menos del 0%.

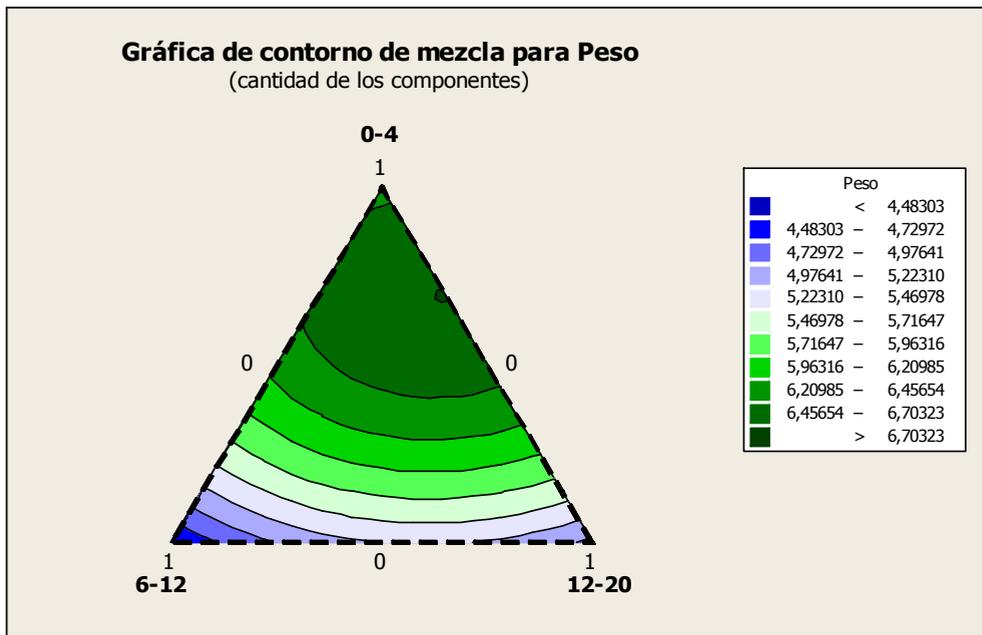


Figura 37: Gráfica de contorno de mezcla para peso

En la figura 37 de contornos se ve hacia donde tienden las dosificaciones a aumentar su compacidad, las zonas verdes oscuras son las de mayor compacidad, mientras que las azules son las de menor compacidad.

La figura 38 es una representación en 3D de la figura 37. La denominada superficie de respuesta.

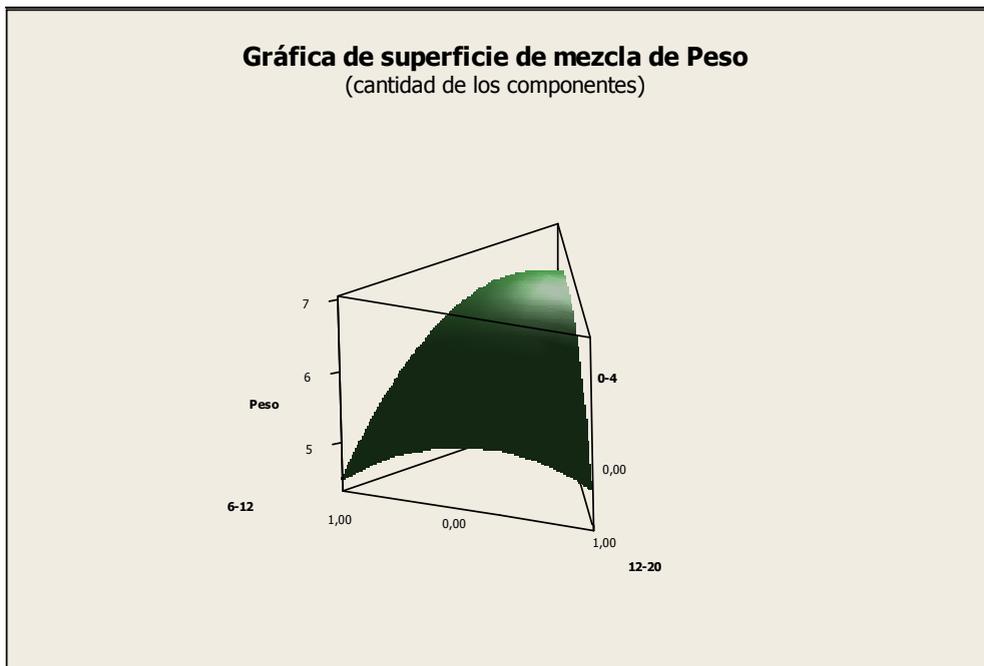


Figura 38: Gráfica de superficie de mezcla de peso.



OPTIMIZACIÓN

7. OPTIMIZACIÓN

Optimizar consiste en maximizar el valor de una variable, en este caso el peso. En otras palabras, determinar el valor máximo del peso en función de los tipos de áridos utilizados. El por qué de optimizar es para conseguir el menor número de huecos posibles, o sea, la máxima compacidad.

La máxima compacidad produce una disminución de volumen de huecos, originando un hormigón más económico. Debido a precisar de menos pasta de cemento. A la vez que, el hormigón resulta más resistente. Ambas cualidades justifican el estudio de la optimización granulométrica de los áridos.

La máxima optimización que predice el software estadístico utilizado es la dada en la figura 39.

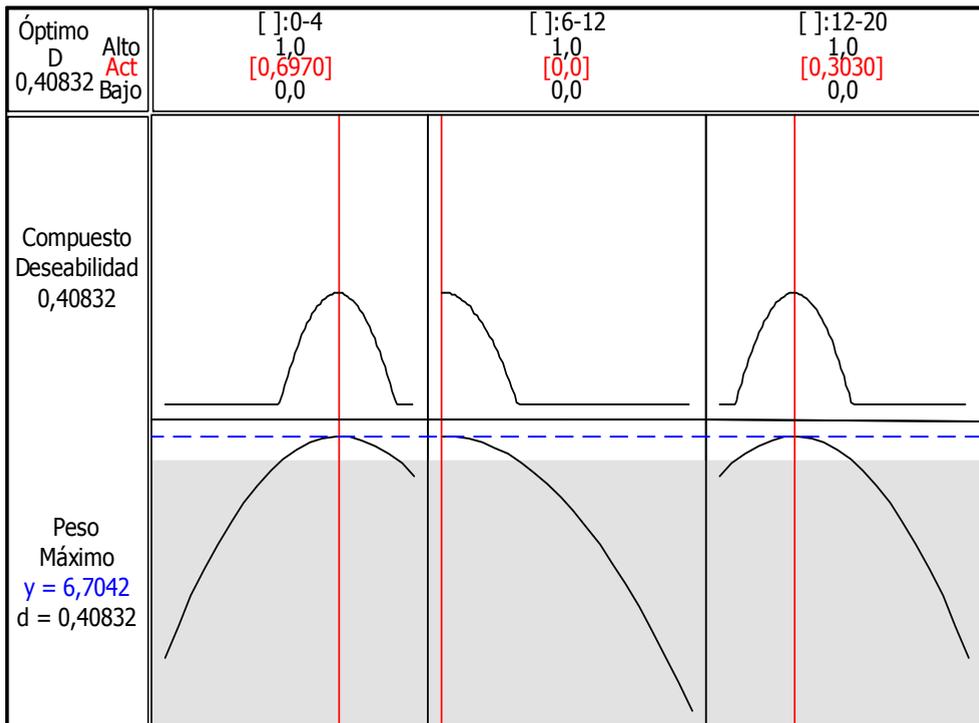


Figura 39: Optimización de los áridos



En esta gráfica se aprecia que la máxima dosificación posible sería un 69,70% de áridos del 0-4 y un 30,30% de áridos del 12-20.

En la primera fila de imágenes de la figura 39 se muestra la deseabilidad del componente (eje de abscisas) respecto al porcentaje (eje de ordenadas) de cada tipo de árido, dependiendo la columna que se observe. La primera columna pertenece al árido 0-4, la segunda columna corresponde al árido 6-12, y la tercera columna compete al árido 12-20.

En la segunda y última fila se analiza el peso de la mezcla (eje de abscisas) respecto al porcentaje (eje de ordenadas) de cada tipo de árido, dependiendo la columna que se observe. Al igual que en la primera fila, la primera columna pertenece al árido 0-4, la segunda columna corresponde al árido 6-12, y la tercera columna compete al árido 12-20.

También es de destacar, que las rectas verticales de color rojo corresponden al porcentaje óptimo de cada tipo de árido. Y la recta discontinua horizontal marca el peso optimo que se puede alcanzar.

El peso obtenido con esta dosificación de máxima compacidad sería de 6,7042 kg, para la probeta utilizada en estos ensayos.

En definitiva, tras los ensayos realizados y el análisis estadístico concluido, se puede afirmar con total seguridad, y un porcentaje mínimo de error, que la dosificación de optima para estos tipos de áridos es discontinua, con un porcentaje de 69,70% de áridos finos del 0-4 y un 30,30% de árido grueso del 12-20. Sin utilizar nada de árido del 6-12 en la mezcla. Además, esta dosificación en la probeta utilizada durante los ensayos pesaría 6,7042 kg.



CONCLUSIONES



8. CONCLUSIONES

En este último capítulo nos dedicaremos a reunir a modo de conclusión todos aquellos aspectos que hayan resultado importantes en base a todos los datos con los que hemos trabajado durante el proyecto.

Ya en otros capítulos, hemos ido concluyendo cada uno de los resultados que hemos ido obteniendo, comentando aquellos resultados más relevantes y las conclusiones que se podían extraer de ellos. Por ello, dedicaremos este capítulo, no a presentar resultados numéricos de los distintos ensayos llevados a cabo en laboratorio, sino a expresar de forma clara y concisa los hallazgos obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

El más relevante de los resultados obtenidos en esta investigación es la discontinuidad de la granulometría obtenida al optimizar por el método lineal de superficies de respuesta para mezclas. Los estudios de Feret demostraron que el mínimo volumen de huecos se obtiene con granulometrías discontinuas. Al tener menor número de huecos entre áridos, se obtiene una mayor compacidad del hormigón, pero no hay que olvidar que, tiene el inconveniente de ser mezclas más sensibles a las variaciones de dosificación o de relación agua/cemento.

Los métodos tradicionales idealizan los áridos considerándolos esferas perfectas, este método no requiere de esta hipótesis ya que se realiza con datos reales, obteniendo aproximaciones basadas en la realidad y no en idealizaciones.

Los resultados obtenidos son solo validos para el tipo de árido de la cantera utilizada. Ya que todas las canteras son distintas y además, también se debería considerar la variedad de forma de los áridos, el tipo de machaqueo del árido, etc. Sin embargo, el método si es apto para poder utilizarse para cualquier cantera y tipo de árido, consiguiendo así, no tener que realizar infinidad de pruebas para aproximarse a la granulometría optima. Con 16 experimentos se podría saber cuál es la dosificación optima para



una mezcla de tres tipos de áridos distintos con un % de error mínimo, aproximadamente un 1% de error, respecto al peso final de la dosificación.

El método de superficies de respuesta se utiliza cuando un estudio tiene un comportamiento que puede considerarse como parabólico. En particular, se ha utilizado "Regresión Cuadrática". Debido, a que en los ensayos realizados, se ha podido comprobar, que ha sido el método que mayor aproximación ha obtenido respecto a los demás.

Gracias al software informático utilizado, se pueden poner restricciones en la cantidad de áridos utilizados. El punto óptimo de dosificación es dado con un 69,7% de árido fino del 0-4mm y un 30,3% de árido grueso del 12-20mm, produciendo una granulometría discontinua. El programa permite limitar la cantidad de arena en la dosificación, de forma que no se necesite una cantidad elevada de agua, que repercute negativamente en la dosificación final.

Es de preciado interés, analizar el porqué es normal, y a la vez necesaria la existencia de una gran cantidad de finos en la mezcla óptima. El "efecto pared" que descubrió Caquot produce que "cuanto menor sea la dimensión del molde, menor será también la compacidad de los áridos gruesos". Estos huecos son rellenados con los finos, para no producir cavidades de aire, y así mejorando su compacidad.

Además indicar, que si no fuesen los finos, los encargados de ocupar estos huecos de aire producidos, sería en un futuro el cemento el encargado de ello, debiéndose añadir una cantidad mayor de la necesaria, que dejaría de actuar en su misión de conglomerante, desperdiándose material.

El estudio realizado sobre la optimización del esqueleto granular puede ser de gran utilidad para la creación de hormigones con una mejor dosificación de sus áridos. Sin la necesidad de tener que realizar experimentalmente numerosos ensayos para obtener la óptima mezcla de los áridos.



Los áridos aportan mayoritariamente la resistencia mecánica del hormigón, y una gran compactación de ellos produciría grandes mejoras. Pero también requieren un mayor control de fabricación.

Las composiciones granulométricas de elevada compacidad dan lugar a masas poco trabajables y que se disgregan con facilidad. Pero si se dispone de medios adecuados para su correcta puesta en obra y compactación, pueden obtenerse con ellas hormigones muy resistentes, con una elevada durabilidad y poca retracción.

El empleo de esta metodología de dosificación es de gran interés para su empleo en hormigones vibro-comprimidos donde la segregación está controlada. También se puede emplear para hormigones plásticos, blandos y fluidos, dado que hay más pasta de cemento libre que hace la función de ligante, aunque es necesaria la supervisión por personal experto para evitar posibles problemas de segregaciones.



TRABAJOS FUTUROS



9. TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se pretende, una vez analizados los resultados obtenidos en esta investigación, ir más allá y ver que posibles investigaciones se podrían realizar en futuras supuestas investigaciones, partiendo como base lo ya realizado y como finalidad posibles cuestiones surgidas durante el desarrollo de la investigación.

Antes de pensar en futuras investigaciones centradas en la aplicación de lo aprendido en este proyecto, proyectado sobre hormigones, se podría variar el método utilizado y comprobar las diferencias respecto al actual.

- 1- Utilización de otro tipo de molde donde la cabeza de la probeta sea de menor superficie, dando así, menores diferencias de peso en el refrentado.
- 2- Realización de los ensayos con diferente maquina dosificación, es decir, la utilización de una maquina vibradora, en lugar de la utilizada, por ejemplo.
- 3- Realización del método de ensayo con diferentes tipos y tamaños de áridos.
- 4- Utilización de áridos de otras canteras.

Además, cabría la posibilidad de utilizar otros tipos de métodos de optimización estadísticos diferentes.

- 5- Aplicación del método basado en redes neuronales para hacer un comparativo respecto al método utilizado de superficies de respuestas.

Una de posibilidades que da la utilización del procedimiento informático utilizado es la restricción de la cantidad de árido de cada tipo que se desea utilizar, pudiendo poner cantidades mínimas y máximas que se desean que se tengan dentro de la mezcla.



- 6- Utilización de restricciones en las proporciones de áridos usados para obtener mezclas con unas características específicas deseadas. Como el añadir una cantidad de finos máxima, para que el hormigón no requiera mucha agua.

Teniendo en cuenta, que estos ensayos se realizaron con el fin de poder producir un hormigón de alta resistencia, optimizando la compacidad a través de los áridos:

- 7- Aplicar los datos extraídos de esta investigación y aplicarlos a hormigones.

Ello, serviría además, para obtener conclusiones. Si daría resultado el optimizar la compacidad del árido para mejorar así la resistencia del hormigón, o si la mejora sería irrelevante o nula.

Caquot ya expuso su teoría sobre el "efecto pared", y como las dimensiones del molde también influye en la compacidad del hormigón.

Teniendo en cuenta esta teoría, se debería tener en cuenta el molde utilizado para los posibles futuros ensayos de hormigón, y la utilización de varias formas y dimensiones diferentes, y ver cómo influye.

De acuerdo con Feret "*la máxima compacidad proporciona la máxima resistencia*", de ello se puede intuir, que al optimizar la compacidad de los áridos utilizados en un hormigón, se aumentaría por consecuencia la compacidad del hormigón, algo lógico, pero deben de tenerse en cuenta otras variables, que también afectan a la resistencia de tal hormigón.

Como bien explico Fernández Cánovas [xx] habría que tener en cuenta, en los hormigones realizados con el método utilizado, si existe un exceso de finos. Ya que ello propiciaría una disminución de la calidad del hormigón en todos los aspectos.

Feret demostró que el mínimo de huecos corresponde a las granulometrías discontinuas. Más tarde, Fuller, demostró que las



granulometrías continuas proporcionaban hormigones más trabajables.

Es por ello que como posible trabajo futuro podría comprobarse que merece mayor importancia, si la docilidad o la compacidad, dependiendo el posible uso que se vaya a aplicar al hormigón.

- 8- Las dosificaciones de hormigón que apuran al máximo las posibilidades de los materiales empleados son muy sensibles a las variaciones. Por ello sería pertinente realizar un análisis de que variaciones podría soportar el hormigón, obtenido de la mezcla óptima de áridos extraída de esta investigación, en casos de cambios de temperatura o diferentes partidas del árido empleado.



ANEJOS



10. ANEJOS

10.1. ANEJO I

10.1.1. EVOLUCION DEL METODO DE ENSAYO

El método de ensayo sufrió constantes cambios a lo largo del tiempo que se estuvo en el laboratorio, ya que la idea inicial de cómo se tenía que hacer el ensayo producía errores, por lo que se debía intentar evitar todos los errores posibles, para que los resultados fuesen correctos.

En principio, se basa el ensayo en el procedimiento "ASTM C 29/C 29M - 97", el cual se fue modificando y adaptando a lo que se necesitaba y a los medios que se disponían.

A continuación se expone de forma detallada el "día a día" de la evolución del método de ensayo.

10.1.2. PRACTICAS EN LABORATORIO

10.1.2.1. 1º ENSAYO (16/JUNIO/2011)

La prueba de hoy consiste en ver cuánto puede afectar el tiempo de vibrado en la compactación de los áridos, para así poder tener el rango de máximo y mínimo de la variable de entrada "tiempo de vibrado".

Se han realizado 4 pruebas en un recipiente cilíndrico de 5 litros de volumen aproximadamente. Todos los ensayos se han realizado en 3 capas (tongadas) de la misma cantidad aproximadamente. Y el vibrador se ha colocado siempre de la misma.

1º Experimento

Se ha realizado con 11 kg de mezcla de finos y gruesos en una proporción de 50% - 50%.



Se ha vibrado cada capa 20 segundos, es decir, entre las 3 capas acumulan 60 segundos de vibrado. Y una vez enrasado el recipiente cilíndrico con un regle, se ha pesado la mezcla de áridos mas el recipiente (Peso total), obteniéndose un peso de 14,556 kg.

2º Experimento

Se ha realizado con 12 Kg en una dosificación de 50% - 50%, con sus 3 capas y un tiempo de vibrado de 10 segundos a cada capa. Se ha añadido un kilogramo más de mezcla a la dosificación para que al refrentarse rebosase más árido y así facilitar el refrentado. Finalmente al pesarlo ha dado un peso total de 14,231 kg.

Hasta aquí se pensaba que iba bien, y que como podía observar, el tiempo de vibrado influía más de lo que se pensaba, ya que con 10 segundos más de vibrado por capa, cabían unos 320 g mas en el recipiente, y eso significa que estaba más compacta la mezcla, mejorando considerablemente su densidad y disminuyendo el volumen de huecos.

3º Experimento

Se ha realizado el ensayo con 12 kg de mezcla, en 3 capas, una dosificación de 50% - 50% y un tiempo de vibrado de 20 segundos por capa y se ha obtenido un peso total de 13,906kg.

Esto no tiene sentido, ya que ha obtenido un menor peso que en el segundo experimento, que si no se tuviese el primer experimento podría creerse, pensando que igual con 20 segundos se segrega la mezcla y hace que no sea compacto, pero el problema es que en el primer experimento, que es igual que este, sale una diferencia de peso total de 650g, cuando deberían ser semejantes. Esto no tiene sentido, ya que el error producido nos parece excesivo.

4º Experimento

El cuarto experimento es una repetición del segundo. En el cuarto experimento ha vuelto a pasar algo parecido que en el tercer experimento, ya que para ver qué pasaba, se ha repetido el segundo experimento, el cual tiene una dosificación de 50% - 50% y un tiempo de vibrado de 10 segundos por capa. Y el peso



total que ha dado es de 14,400 kg, 169 g más que en el experimento anterior.

10.1.2.2. 2º ENSAYO (21/JUNIO/2011)

Se ha intentado comprobar el porqué se diferenciaban tanto las pruebas del día 16 de Junio, y para ello se han realizado los experimentos por otra persona para ver si el fallo era un fallo humano, o por el contrario debería cambiarse la forma de realización (tipo de vibrado, probeta, capas, áridos, dosificación, etc.)

1º Experimento

Se ha realizado igual que en los ensayos anteriores, numero de capas, tipo de vibrador, solo que al tiempo de vibrado se le ha puesto de una forma aleatoria, hasta el punto que se considere que estaba suficientemente vibrado.

Los tiempos de vibrado han sido:

- 1º Capa: 36 segundos de vibrado (15 segundos por un lado y 21 segundos por el otro)
- 2º Capa: 52 segundos de vibrado (35 segundos por un lado y 17 segundos por el otro)
- 3º Capa: 41 segundos de vibrado (21 segundos por un lado y 20 segundos por el otro)

La probeta ha dado un peso de 14'824 kilogramos.

2º Experimento

Se ha realizado igual que el primer experimento. Los tiempos de vibrado fueron:

- 1º Capa: 62 segundos de vibrado (34 segundos por un lado y 28 segundos por el otro)
- 2º Capa: 76 segundos de vibrado (39 segundos por un lado y 37 segundos por el otro)
- 3º Capa: 64 segundos de vibrado (39 segundos por un lado y 25 segundos por el otro)



La probeta ha dado un peso de 14'966 kilogramos.

Conclusiones

Como se puede apreciar el vibrado influye, ya que en el segundo experimento el peso ha sido mayor ya que el tiempo de vibrado ha sido mayor, resulta bastante lógico. Pero se sabe que hay algo más que afectaba de forma arbitraria, que hacía que nunca saliese el mismo peso al final con dos pruebas iguales, y eso es lo que se quiere averiguar, y modificar. Para así tener un método de ensayo correcto.

- Tras ver la realización del ensayo se observaba que el árido se segrega mucho, y para ello se ha probado en hacer el ensayo en una sola capa, ya que así solo se segregaría la parte de arriba, la cual al refrentar la probeta se quita.
- Además se ha querido estabilizar el vibrado, porque el método utilizado hasta ahora no era exacto, así que se ha atado el vibrador al molde para que así el tipo de vibrado siempre fuese el mismo.

3º Experimento

Se ha intentado estabilizar el vibrado, utilizando una sola capa, todo lo demás se ha realizado igual, con la misma dosificación, el mismo tipo de áridos, etc.

Se hizo una sola capa con un tiempo de vibrado de 3 minutos y al pesarse dio un peso de 14'781 kg.

4º Experimento

Se ha realizado el mismo experimento que antes, el experimento número 3, para ver si los resultados obtenidos son iguales, para ver si el método utilizado es exacto.

Pero el ensayo ha dado un peso de 14'342 kg.

Conclusiones

El vibrado no es el adecuado, ya que cada vez que se intenta dar el mismo tiempo de vibrado se obtienen diferentes pesos, por lo



tanto, se ha de desechar este tipo de vibrado. Por ello, método utilizado hasta ahora tiene fallos.

Se ha reflexionado y finalmente se ha pensado que lo más adecuado es utilizar un mezclador por golpes o una mesa vibradora.

10.1.2.3. 3º ENSAYO (27/JUNIO/2011)

Tras los ensayos realizados y la conclusión de buscar otro tipo de vibrado se ha pensado en una mesa vibradora, la cual, se ha intentado utilizar, pero por falta de presupuesto, no ha sido posible. Así que se ha utilizado una máquina de golpes, como describe el método de ensayo normalizado.

El método utilizado para la realización de los ensayos es el método de asentado, el cual se basa en dejar caer la probeta 25 veces por cada lado desde una altura de 5cm.

Cabe mencionar que se ha cambiado el tipo de probeta, por uno que tiene un cabecero para que no se cayese la mezcla, debido al golpeo producido por la maquina al dejar caer la probeta 5cm. Otro motivo por el cual se ha cambiado la probeta es porque la nueva probeta tiene en la parte inferior una placa que aporta mayor sujeción a la maquina utilizada.

Respecto al método utilizado mencionar también, que se ha modificado la cantidad de golpes para ver si esto afectaba al peso obtenido.

1º Experimento

Se ha realizado la mezcla que se ha utilizado todo el tiempo, 50%-50%, y se hizo en 3 capas y se le ha dado en este experimento 30 golpes por capa.

Se ha quitado la parte superior, se ha refrentado y ha dado un peso de 15'688 kg.



2º Experimento

Se ha realizado todo igual, para ver si el método era correcto y se obtenían así resultados parecidos. Para poder empezar a utilizar otras dosificaciones y otras variables. Pero el peso de la probeta ha sido de 15'579 kg.

Conclusiones

El vibrado es siempre igual, porque la maquina no puede fallar ya que es un procedimiento mecánico, así que se ha pensado que debido a ser 3 capas, se produce mucha segregación y que esta, probablemente no siempre es la misma, porque se sabe que al terminar cada capa y golpear se segrega siempre. Así que se ha pensado realizar del mismo modo pero con una sola capa, y así que se segregase solo la zona superior, la cual, al quitar el cabecero del molde no estaría segregada. Ya que se cree que esta es la causa de la diferencia de pesos.

También se ha pensado que en el siguiente ensayo además de hacerse solo de una capa, girar el molde para que no siempre segregue por la misma zona, ya que se ha visto como había una tendencia a que se quedaran los gruesos en la zona desde donde la barra se levanta.

10.1.2.4. 4º ENSAYO (30/JUNIO/2011)

Se han realizado los experimentos con la misma dosificación que los ensayos anteriores (50%-50%), en la misma probeta que en el ensayo realizado el día 27 de junio, con el mismo aparato, una maquina de golpes, y todo en una sola capa.

Esta vez para intentar estabilizar los pesos se ha intentado perfeccionar más el método, colocando la probeta en el centro de la superficie de la máquina de golpes.

1º Experimento

Se ha realizado el procedimiento normal y en la maquina se han programado 60 golpes. Se ha obtenido un peso de 15'629 kg.



2º Experimento

Igual que la anterior para ver si salían los mismos resultados, y por primera vez, así ha sido, ha salido un peso de 15'636 kg.

3º Experimento

Para corroborar que no ha sido casualidad, sino que realmente se había encontrado el método correcto, se ha vuelto a repetir, y ha salido 15'688 kg, peso que difiere algo más, pero sigue siendo mucho menos que en los ensayos anteriores.

4º Experimento

En este experimento se han cambiado la cantidad de golpes a 120, para ver si había mucha variación dependiendo de la cantidad de golpes que se daban, y si así producía una mayor compactación. El resultado ha sido 15'737 kg.

5º Experimento

Se ha repetido el cuarto experimento para ver si el resultado anterior ha sido correcto, y así ha sido. Ya que ha dado un peso de 15'723 kg.

6º Experimento

La segunda repetición del cuarto experimento ha dado un resultado de 15'777 kg. Este resultado difiere un poco más que el anterior, pero sigue estando dentro de los límites que consideramos correctos.

Conclusiones

Se ha conseguido que el resultado obtenido de unos valores muy aproximados entre si, lo cual es primordial. Además, al aumentar el número de golpes de 60 a 120 se ha observado cómo se compacta aproximadamente 100g más la mezcla de áridos. Esto indica que con una mayor cantidad de golpes el experimento alcanzará mayores compactaciones.

Esto será la intención del siguiente ensayo, comprobar a qué cantidad de golpes no se puede compactar más y se estabiliza.



10.1.2.5. 5º ENSAYO (05/JULIO/2011)

En estos experimentos se pretende averiguar a qué cantidad de golpes la mezcla de áridos deja de compactarse, o en su defecto, empieza a segregarse.

Se realizará siempre con la misma dosificación que las anteriores (50%-50%), en la misma probeta que en los ensayos anteriores (día 27 y 30), y con el mismo aparato, una máquina de golpes, y todo de una sola capa.

1º Experimento

Se ha realizado con 200 golpes en la máquina, y se ha obtenido un peso de 15'662 kg.

2º Experimento

Igual que el primer experimento, con 200 golpes, para corroborar el experimento anterior, y ha salido un peso de 15'686 kg.

3º Experimento

Se ha aumentado la cantidad de golpes hasta 400 para ver que sucedía, ha dado un peso de 15'979 kg. Con el inconveniente de que la segregación de la mezcla ha sido excesiva.

Conclusiones

Cuando se aumenta mucho la cantidad de golpes pasa lo mismo que cuando se realizaban los experimentos con varias capas, se segrega mucho la mezcla. Debido a esto, no se pueden realizar tantos golpes, aunque tenga un mayor peso, porque la realidad es que no está más compacta la dosificación, ya que la dosificación se ha separado dejando arriba gran cantidad de los gruesos.

Eso ha llevado a la hipótesis de que quizás el árido, de forma natural, intenta ir a la dosificación óptima, ya que esta es aproximadamente en un 70%-30% (finos - gruesos) como se ha podido observar en otros experimentos realizados en este laboratorio.

10.1.2.6. 6º ENSAYO (15/JULIO/2011)

Estos experimentos se han realizado para comprobar a qué cantidad de golpes tiene la máxima compacidad (mayor peso) la mezcla propuesta. Comprobando de forma visual que no se segregue, y además, comprobar en todos los experimentos la dosificación de los restos de la mezcla refrentada (lo que sobra) para ver así si se segrega o no.

1º Experimento

Se ha realizado como en los ensayos anteriores, con una cantidad de 50 golpes, con dosificación de 50%-50% y una cantidad de 3,933 kg de cada tipo de árido, es decir, una mezcla de 7,866 kg.

Tras realizar el experimento se ha pesado y ha dado un peso de 15,720 kg, de los cuales 0,610 kg son restos de grava al refrentarse y 0,482 kg de arena, por lo que tiene unas pérdidas de 14 g, prácticamente insignificante. Estas pérdidas son las partículas de polvo (fillers).

2º Experimento

Esta vez se ha realizado a 100 golpes, con la misma mezcla que en el experimento anterior, es decir, 14 gramos menos de arena debido a las pérdidas del experimento anterior. Estas pérdidas no afectan.

El peso de la probeta tras la compactación ha sido 15,797 kg, de los cuales las dosificaciones han sido 45% de grava y 55% de arena, ya que los restos al refrentarse han sido 0,840 kg de grava y 0,168 kg, produciéndose una clara segregación. Debido a que al mezclarse manualmente antes de depositarse en la probeta para su posterior mezclado, se deduce que, no es la manera más correcta.

3º Experimento

Se ha realizado de forma semejante que el segundo experimento pero intentándose que fuese de la manera más correcta posible el vertido en la probeta. Esta vez ha dado un peso de 15'791 kg, casi igual que el anterior, pero los pesos de las sobras fueron 0,408 kg de grava y 0,596 kg de arena, algo mucho más homogéneo.



Obteniéndose una dosificación de los restos del 51,5% - 48,5%, por lo tanto, la mezcla final es prácticamente del 50%-50% que es lo que se buscaba, que no variase la dosificación que se pretendía hacer al terminar el método de ensayo.

Conclusiones

Se ha estipulado que para los próximos experimentos se colocaría como restricción unos márgenes en los que el porcentaje de la dosificación de los restos no sea superior al 55%, ni en grava, ni en arena, para que la mezcla final sea homogénea.

10.1.2.7. 7º ENSAYO (18/JULIO/2011)

Estos ensayos se han utilizado para comprobar a qué cantidad de golpes tiene la máxima compacidad, mayor peso. Realizando la comprobación, que dicha mezcla no segregue, de forma visual. Y comprobándose en todos los experimentos la dosificación del árido de los restos de la mezcla refrentada (lo que sobra) para ver así si se segrega o no.

1º Experimento

Se ha realizado como se ha estipulado en el método, con una cantidad de 200 golpes, con dosificación de 50% - 50%.

Tras realizarse el experimento se ha pesado y ha dado 16,018 kg, de los cuales 0,586 kg son restos de grava, y 0,182 kg de arena. Por lo que la dosificación de los restos era del 76% - 24% respectivamente. Obteniéndose así, una mezcla final del 46,79% de grava y 53,21% de arena.

2º Experimento

Se ha hecho con una cantidad de 200 golpes, con dosificación de 50%-50%.

Tras realizarse el experimento se ha pesado y se ha obtenido un peso de 15.952 kg, de los cuales, 0,480 kg son restos de grava y 0,344 kg de arena. Por lo que las dosificaciones de los restos han sido del 58,25% - 41,75% respectivamente. Y la mezcla final



obtenida daba unas dosificaciones de 48,89% de grava y 51,10% de arena.

3º Experimento

Se ha ejecutado con una cantidad de 200 golpes, con dosificación de 50%-50%.

Tras realizar el experimento se ha pesado y ha dado 16,072 kg, de los cuales, 0,485 kg son restos de grava y 0,209 kg de arena. Por lo que se han tenido unos restos del 69,88% - 30,11% respectivamente. Y la mezcla final ha dado una dosificación de 47,85% de grava y 52,15% de arena.

4º Experimento

Esta vez, el experimento se ha realizado con 150 golpes, con dosificación de 50%-50%.

Tras su realización, el experimento se ha pesado y se ha obtenido un peso de 15,925 kg, de los cuales, 0,430 kg son restos de grava y 0,403 kg de arena. Por lo tanto, la dosificación de los restos es del 51,62% - 48,38% respectivamente. Y la mezcla final ha dado una dosificación de 49,78% de grava y 50,22% de arena.

5º Experimento

Se ha realizado en las mismas condiciones que el cuarto experimento. 150 golpes, con dosificación de 50%-50%.

Tras realizarse el experimento se ha pesado y ha dado 15,758 kg, de los cuales 0,374 kg son restos de grava y 0,618 kg de arena. Por lo que se han tenido unos restos del 37,70% - 62,30% respectivamente. Y la mezcla final ha dado una dosificación de 52,10% de grava y 47,90% de arena.

6º Experimento

Se ha hecho como el quinto experimento, con una cantidad de 150 golpes, y una dosificación de 50%-50%.

Tras realizarse se ha pesado y ha dado 15,994 kg, de los cuales 0,325 kg son restos de grava y 0,419 kg de arena. Por lo que se



han obtenido unos restos de 43,68% - 56,32% respectivamente. Y la mezcla final ha dado una dosificación 50,75% de grava y 49,25% de arena.

Conclusiones

Observándose los resultados y el procedimiento de ensayo, se ha decidido que los ensayos definitivos se realizarían con 125 golpes.

ANEJO II TERMINOLOGIA DE ARIDOS

10.1.3. GRANULOMETRIA

Se denomina granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

10.1.4. MODULO GRANULOMETRICO

Se denomina "Modulo Granulométrico" la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie UNE hasta el de abertura máxima dividida por 100.

$$MF = \frac{\sum \% \text{retenidos acumulados serie preferida (hasta malla 0,16 mm)}}{100}$$

(32)

Los módulos granulométricos de las curvas de Fuller correspondientes a diferentes tamaños máximos del árido son los indicados en la tabla 15.



Tabla 15: Módulos granulométricos de las curvas de Fuller correspondientes a diferentes tamaños máximos del árido.

Tamaño máximo del árido	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
Modulo granulométrico	4,81	5,21	5,45	5,64	5,75	6,00	6,16	6,29	6,44	6,51	6,66	6,71

Para realizar el ajuste granulométrico de la mezcla de los diferentes áridos a la curva de Fuller puede emplearse dos métodos:

1. Sistema de tanteos.
2. Sistema basado en los módulos granulométricos.

Recibe también el nombre de “modulo de finura” o de Abrams cuando se emplea la serie de tamices americana.

El modulo nos da idea del tamaño medio del árido empleado en un hormigón pero, nunca es índice de la granulometría del mismo pues pueden existir infinidad de áridos con el mismo modulo granulométrico, que tengan granulometrías totalmente diferentes.

10.1.5. AJUSTES GRANULOMÉTRICOS

Las granulometrías obtenidas por análisis de los áridos disponibles, arenas, gravillas, gravas, etc., indican la distribución por tamaños de las partículas que los componen y permiten determinar en qué proporciones se han de mezclar aquellos para obtener una granulometría del árido resultante que se parezca lo más posible a una curva granulométrica ideal de compacidad máxima.



Teniendo en cuenta a Feret, la máxima compacidad proporciona la máxima resistencia.

La influencia que sobre las resistencias mecánicas tiene la granulometría del árido grueso es prácticamente despreciable. Sin embargo, la granulometría de las arenas sí tiene una influencia notable que se ejerce a través de su participación en la docilidad del hormigón.

Los áridos deben tener una distribución y porcentaje de tamaños tal, que den lugar al menor número posible de huecos entre ellos.

10.1.6. GRANULOMETRIAS ÓPTIMAS

Se denomina granulometría óptima a la que para una misma consistencia y relación a/c , le corresponde un consumo mínimo de cemento, dando, además el mínimo de segregación.

En principio, las granulometrías óptimas deberían ser las que dejaran menos huecos, es decir, las que diesen la máxima compacidad. Feret demostró que el mínimo de huecos corresponde a las granulometrías discontinuas. Más tarde Fuller, demostró que las granulometrías continuas proporcionaban hormigones más trabajables, con lo cual corrigió las teorías de Feret hizo que se pasase al empleo de las granulometrías continuas. Bolomey y Otto Graf llegaron más lejos haciendo intervenir, por primera vez, al cemento como si fuese un árido fino y viendo la relación cemento/árido que daba lugar a la granulometría óptima. Vallete era partidario de introducir la menor cantidad de finos a fin de reducir la de agua. En definitiva, las granulometrías continuas dan lugar a hormigones más dóciles que las discontinuas requiriendo menos energía de compactación de estas.

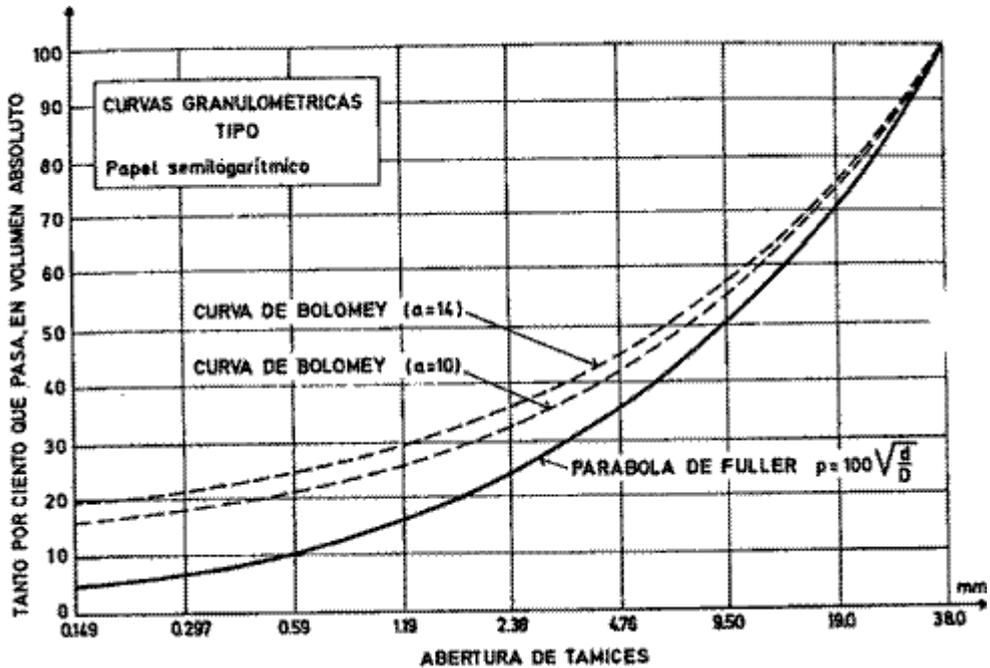


Figura 40: Curvas granulométricas

10.1.7. DOMINIOS GRANULOMETRICOS

Tabla 16: Dominios granulométricos

Dominio	Utilización	Características
1	No conveniente	Masas de difícil puesta en obra.
3	Muy conveniente	Masas dóciles y trabajables; hormigones resistentes.
4	Todavía utilizable	Hormigones resistentes, poco con retracción.
5	No conveniente	Exigen demasiada agua de amasado

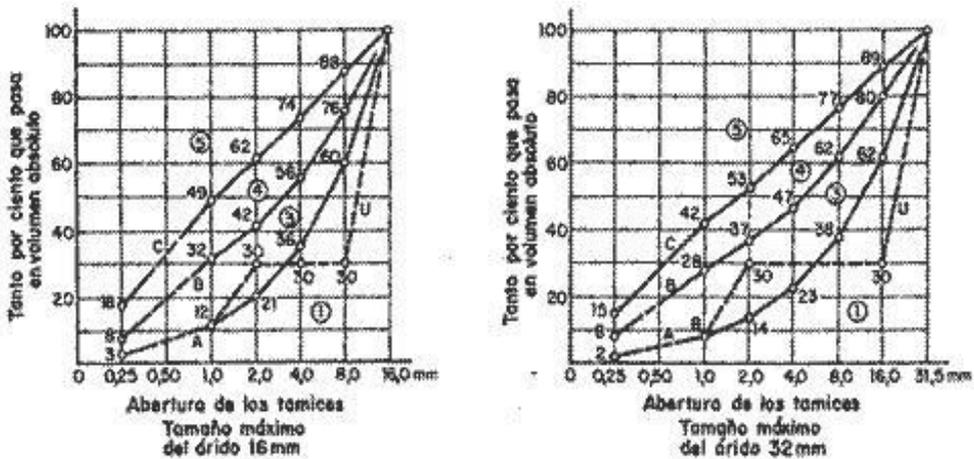


Figura 41: Dominios granulométricos

10.1.8. ARIDO FINO Y ARIDO GRUESO

La división más simple de árido sería en árido fino y árido grueso.

La Instrucción española del hormigones como árido fino o arena a la fracción del mismo que pasa por el tamiz de 4 mm, siendo un árido grueso la fracción del mismo que queda retenida en este tamiz.

Dentro de esta clasificación en las arenas caber hacer distinción entre gruesas de tamaño de 2 a 4 mm y finas las comprendidas entre 0,063 y 2 mm, denominándose finos o "filler" a la fracción de tamaño inferior a 0,063 mm.

La arena es el árido de mayor responsabilidad en los hormigones. No es posible hacer un buen hormigón con una arena mala.

Las arenas procedentes de machaqueo son siempre buenas mientras no tengan exceso de finos.

En general, las variaciones de la granulometría de las gravillas y gravas influye poco en la resistencia de los hormigones a igualdad de relación agua/cemento, sin embargo, no ocurre igual con las variaciones en la granulometría de las arenas, pues dependiendo de la composición de estas, las propiedades del hormigón variarán de forma notable. Un exceso de finos disminuye la calidad del hormigón en todos los aspectos.

La resistencia de las gravas viene dada por su dureza, densidad, compacidad y modulo elasticidad.

Las arenas y el árido grueso influyen en la resistencia del hormigón como consecuencia de su dureza y de la adherencia con la pasta de cemento.

Tabla 17: Escala granulométrica

ESCALA GRANULOMÉTRICA ARIDOS	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002 – 0,06 mm
Arenas	0,06 – 2 mm
Gravas	2 -60 mm
Cantos rodados	60 – 250 mm
Bloques	> 250 mm



10.1.9. DENSIDAD

La densidad relativa de una sustancia es la relación existente entre su densidad y la de otra sustancia de referencia; en consecuencia, es una magnitud adimensional (sin unidades), expresada en la ecuación 33.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (33)$$

donde ρ_r es la densidad relativa, ρ es la densidad de la sustancia, y ρ_0 es la densidad de referencia o absoluta.

Para los líquidos y los sólidos, la densidad de referencia habitual es la del agua líquida a la presión de 1 atm y la temperatura de 4 °C. En esas condiciones, la densidad absoluta del agua destilada es de 1000 kg/m³, es decir, 1 kg/L.

10.1.10. DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos como el suelo, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire u otra sustancia normalmente más ligera, de forma que la densidad total del cuerpo es menor que la densidad del material poroso si se compactase.

En el caso de un material mezclado con aire se tiene:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} = \frac{m_r + m_{aire}}{V_r + V_{aire}} \quad (34)$$

La densidad aparente de un material no es una propiedad intrínseca del material y depende de su compactación.

La Densidad aparente del suelo (D_a) se obtiene secando una muestra de suelo de un volumen conocido a 105 °C hasta peso constante.



$$D_a = \frac{W_{SS}}{V_s} \quad (35)$$

Donde:

W_{SS} : Peso de suelo secado a 105 °C hasta peso constante.

V_s : Volumen original de la muestra de suelo.

10.1.11. ESQUELETO GRANULAR

Se define al esqueleto granular como el conjunto de materiales inertes del concreto, estos

Se define al esqueleto granular como el conjunto de materiales inertes del concreto, estos son

los agregados tanto finos y gruesos, y se dice que esta optimizado cuando las proporciones entre los agregados finos y gruesos son las mejores para producir una mezcla específica; recientemente se ha considerado a las fibras rígidas o flexibles como parte de este esqueleto, por las modificaciones que producen en este.

10.2. ANEJO III TERMINOLOGÍA DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

10.2.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos es una parte clave del desarrollo de la metodología Seis Sigma para determinar los factores importantes que influyen en un determinado proceso y encontrar su combinación óptima para así mejorar el rendimiento y el producto derivado.



10.2.2. FACTORES

Cualquier influencia que afecta las variables de respuesta (excluyendo a los tratamientos), es controlada casi completamente por el experimentador; de esta variable se desean estudiar los efectos ya sea en una o en varias respuestas. Puede presentarse de forma cuantitativa o cualitativa. Los factores son los componentes del proceso y el nivel en el que éstos se encuentran determina las variables de respuesta resultante, la cual se pretende mejorar u optimizar.

10.2.3. NIVELES DE UN FACTOR

Estados, categorías o intensidades de un factor.

10.2.4. TRATAMIENTOS

Término que se refiere al nivel de un factor (o la combinación de los niveles de varios factores) que afecte directamente a lo que le interesa al experimentador. Las influencias de varios niveles de los factores serán comparadas en el experimento.

10.2.5. ESTRUCTURA DE TRATAMIENTOS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL

Es el conjunto de tratamientos que han sido seleccionados para estudiar y/o comparar; la forma de la estructura de tratamientos dependerá del experimento a realizar y de lo que el experimentador desea analizar.



10.2.6. UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad más pequeña o en la que un tratamiento es aplicado.

10.2.7. VARIABLE DE RESPUESTA

Medida cuantitativa de una unidad después de que el tratamiento es aplicado, su valor depende del tratamiento usado. Es la variable que se investiga y también es conocida como respuesta.

10.2.8. EFECTO PRINCIPAL

Es la contribución de cada factor sobre las variables de respuesta después de medir el cambio producido en éstas (el cambio depende del nivel de cada factor).

10.2.9. INTERACCIÓN

Cuando Existe una relación o dependencia entre dos o más factores, es decir, cuando el efecto de un factor depende del nivel de otro.

10.2.10. VARIABLE CONCOMITANTE

Medida cuantitativa sobre una unidad, tomada antes de que los tratamientos sean aplicados.



10.2.11. BLOQUE

Grupo de unidades experimentales que son homogéneas con respecto a un factor; todas las unidades experimentales en un bloque son afectadas en la misma manera por el factor bajo el cual se formó el bloque.

10.2.12. ERROR EXPERIMENTAL

Debido a que ningún experimento puede considerar de forma explícita a todas las variables potenciales que afectan al experimento, esas variables no se consideran y se les denomina "nivel de ruido" ya que aunque se hace todo lo posible en el experimento por reducirlas (por medio de aleatorización), siempre van a estar presentes provocando variación, por menor que ésta resulte ser. "Un buen diseño es uno en el que las condiciones seleccionadas y manipuladas en el experimento no están confundidas con variables extrañas o de ruido referentes al material experimental a su manejo en el experimento, al ambiente o al tiempo".

10.2.13. CONFUSIÓN

Confusión ocurre cuando el efecto de un factor o tratamiento no puede ser separado o distinguido del de otro factor o tratamiento.



BIBLIOGRAFIA



11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anishchik SV, Medvedev NN.(1995) Three-dimensional apollonian packing as a model for dense granular systems. Phys Rev Lett;75:4314-7.
- [2] Bisgaard S. & FULLER H. T. (1994) Accommodating interaction effects in two-level fractional factorials: An alternative to linear graphs. Quality Engineering, Volume 7, Issue 1, pages 71-87.
- [3] Bisgaard, S. and Steinberg, D. M., (1997), "The Design and Analysis of 2k-p Prototype Experiments," Technometrics, 39, 1, 52-62.
- [4] Bland JM, Altman DG. (1996) Statistics Notes: Transforming data. BMJ; 312:770.
- [5] Box, G. E. P., and Wilson, K. B. (1951). "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions." Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical Methodology, 13(1), 1-45.
- [6] Box, G. E. P., Behnken, DW.(1960) Some new three-level designs for the study of quantitative variables. Technometrics, 2: 455-475.
- [7] Box, G. E. P., and Draper, N. R., (1987), Empirical Model Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [8] Box, G. E. P.,(1999). "Statistics as a catalyst to learning by scientific method part II - A discussion." Journal of Quality Technology, 31(1), 16-29.



- [9] Box, G. E. P., Hunter, W., and Hunter, J. (1999). "Estadística para investigadores: Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos." Editorial Reverté, Barcelona.
- [10] Bradley A. Lerch. (1999) Unusual nonlinear response of some metallic materials. *Mechanics of Materials*, Volume 31, Issue 9, September 1999, Pages 565-577.
- [11] Cesar Luaces (2007). *Los áridos y el cemento*. Dirección General de Industria, Energía y Minas, Comunidad de Madrid, Editorial *Domenech e-learning multimedia SA*.
- [12] Cornell, J. A. (1984). "Response-Surface Methodology - the Past, Present and Future-Directions." *Biometrics*, 40(4), 1187.
- [13] Cornell, J. A., (1990), *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [14] D.C. Montgomery,(1981) *Design and Analysis of Experiments*, 2nd ed., Wiley, New York.
- [15] Ding, J. T., Yan, P. Y. & Zhu, J.Q. (1999). Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 29, 957-960.
- [16] Etxebarria Murgiondo, J. (1999) *Regresión Múltiple*. Madrid: La Muralla.
- [17] Farris J. (1968). Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data. *Transactions of the Society of Rheology*. Vol 12, No 2, 281-301.
- [18] Fernández Cánovas (1989) *Hormigón*. Ed. *Rugarte S.L.*
- [19] Fernando Cassinello (1996). *Construcción Hormigonera*. Ed. *Rueda*.



- [20] Fu G, Dekelbab W.(2003) 3-D random packing of polydisperse particles and concrete aggregate grading. *Powder Technol*;133(1-3):147–55.
- [21] Furnas C. C. (1931). Grading aggregates I mathematical relations for heads of broken salids of maximum density. *Industrial and Engineering Chemistry* , Vol 23, No.9, 1052.
- [22] Garboczi EJ.(2002) Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: application to aggregates used in concrete. *Cem Concr Res*;32(10):1621–38.
- [23] Gary D. Friedman, Gary R. Cutter, Richard P. Donahue, Glenn H. Hughes, Stephen B. Hulley, David R. Jacobs Jr., Kiang Liu, Peter J. Savage. (1988). "Cardia: study design, recruitment, and some characteristics of the examined subjects" *Journal of Clinical Epidemiology*, Volume 41, Issue 11, Pages 1105-1116.
- [24] Goltermann, P. ,Johansen, V. & Palbøl, L. (1997). Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. *ACI Materials Journal* September-October.
- [25] Härdle.(1990) *Aplied Nonparametric Regression*. Cambridge: University Press.
- [26] Hotelling H.(1991). "The economics of exhaustible resources." *Bulletin of Mathematical Biology* Volume 53, 1–2, 281–312.
- [27] Huan He, Zhanqi Guo, Piet Stroeven, Martijn Stroeven, Lambertus Johannes Sluys. (2009) Characterization of the packing of aggregate in concrete by a discrete element approach. *Materials Characterization* 60:10, 1082-1087.
- [28] Hunter E. A. (1996) *Experimental design. Data Handling in Science and Technology*, Volume 16, Pages 37-69.



- [29] Jian-Tong Ding, Pei-Yu Yan, Shu-Lin Liu, Jin-Quan Zhu. (1999). Extreme vertices design of concrete with combined mineral admixtures. *Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 6, Pages 957-960.*
- [30] Jiménez Montoya (2004). Hormigón armado 14^o edición. Ed. Gustavo Gili S.A.
- [31] Joan Ferré, F. Xavier Rius. Introducción al diseño estadístico de experimentos. www.quimica.urv.es/quimio/general, septiembre del 2008.
- [32] Kwan AKH, Mora CF.(2001) Effect of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Mag Concr Res ;53(2):91-100.*
- [33] Lewis S. L., Montgomery D. C., and Myers R. H. (2001). Examples of designed experiments with non normal response. *Journal of Quality Technology*, 33 265-278.
- [34] McGeady R. K. (1961). Mechanical packing of spherical particles. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol 44, 513.
- [35] Menendez, G., Bonavetti, V.L., Irassar, E.F (2008). Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón. *Revista de la Construcción*. 7, 94-104.
- [36] Montenegro, O. Cabrera, E. F. Irassar (2000). Factor de empaque: Influencia de la forma y textura del agregado fino. *Proc. Congreso de Ingeniería 2000, Estructuras, Materiales y Técnicas Constructivas hacia el Siglo XXI, Buenos Aires*, 236-247.
- [37] Myers, RH, Carter, WH.(1973) Response surface techniques for dual response systems. *Technometrics*, 15: 301-317.



- [38] Myers, RH, Khuri, AI, Vining, GG.(1992) Response surface alternatives to the Taguchi robust parameter design approach. *Am Stat*, 46: 131–139.
- [39] Myers, RH, Vining, GG, Giovannitti-Jensen, A, Myers, SL.(1992) Variance dispersion properties of second order response surface designs. *J Quality Technol*, 24: 1–11.
- [40] Myers, R. H., and Montgomery, D. C., (1995), *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- [41] Myers, R. H. (1999). "Response surface methodology - Current status and future directions." *Journal of Quality Technology*, 31(1), 30-44.
- [42] Myers, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Borror, C. M., and Kowalski, S. M. (2004). "Response surface methodology: A retrospective and literature survey." *Journal of Quality Technology*, 36(1), 53-77.
- [43] Nagaraj TS, Shashiprakash SG, Prasad BKR (1993) Reportioning concrete mixes. *ACI Mater J* 90(1):50–58.
- [44] O'Reilly D.V. (1993). *Métodos para la dosificación del concreto*. Ed. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- [45] Pan, G., Sun, W., Ding, D., & Zhang, Y. (1998). Experimental study on the micro-aggregate effect in high-strength and super-high-strength cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 28(2), 171–176.
- [46] Pellicer D. (1989). *El hormigón armado en la construcción*. Ed. *Grefol S.A.*
- [47] Pita Fernández S, Rey Sierra T, Vila Alonso MT.(1997) Relaciones entre variables cuantitativas (I). *Cadernos de Atención Primaria*; 4: 141-145.



- [48] Popovics S. (1992). Concrete Materials. Properties, specifications and testing. (Second edition). Noyes Publications.
- [49] R. Mead, D.J. Pike. (1975) A review of responsesurfacemethodology from a biometric viewpoint. *Biometrics*, 31, pp. 803–851.
- [50] Roquemore K. G. (1976). Hybrid designs for quadratic response surfaces. *Technometrics*, 18(4), 419-423.
- [51] Seber GAF. (1977) Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons.
- [52] Simon, M., Snyder, K. & Frohnsdorff, G. (1999). Advances in concrete mixture optimization. Concrete Durability and Repair Technology Conference. September 21-32.
- [53] Sobolev, K. & Amirjanov, A. (2004). The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies. *Powder Technology*. 141. 155- 160.
- [54] Sobolev, K. & Amirjanov, A. (2010). Application of genetic algorithm for modeling of dense packing of concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, 1449-1455.
- [55] Soudki KA, El-Salakawy EF (2001) Full factorial optimization of concrete mix design for hot climates. *J Mater Civil Eng* 13(6):427–433.
- [56] Stock, A. F., Hannant, D. J., Williams, R.I.T. (1979) The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete. *Magazine of Concrete Research*, nº 31, vol. 109, pp. 225-234.



- [57] Stovall, T., De Larrard, F., Buil, M.(1986)Linear packing density model of grain mixtures. powder technology, Volume 48, Issue 1, Pages 1-12.
- [58] Suresh Kumar Reddy.(2011) Activated carbon from date palm seed: Process optimization using response surface methodology. Waste and biomass valorization, Volume 3, Issue 2, pp 149-156.
- [59] W.J. Hill, W.G. Hunter. (1966) A review of response surface methodology: a literature survey. Technometrics, 8, pp. 571–590.
- [60] Wang L, Wang X, Mohammad L, Abadie C.(2005) Unified method to quantify aggregate shape angularity and texture using Fourier analysis. J Mater Civil Eng;17(5):498–504.
- [61] Xie, Y., Liu, B., & Long, G. (2001). Study on dense packing properties of cementitious materials. Journal of the Chinese Ceramic Society, 29(6), 512–517, in Chinese.
- [62] Yanzhou Penga, Shuguang Hub, Qingjun Ding. (2009) Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material. Particuology 7, pp 399–402.
- [63] Yeh, I. C. (2009). Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex centroid mixture design and neural networks. Engineering with Computers, 25, 179-190.