

Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte III: optimización por multicriterios

Concretes with ternary composite cements. Part III: multicriteria optimization

G. Menéndez^(*), V. L. Bonavetti^(*) y E. F. Irassar^(*)

Recepción/Received: 20-X-05
Aceptación/Accepted: 3-V-06

RESUMEN

Los métodos de optimización constituyen una herramienta de vital importancia en el diseño de materiales compuestos, donde la cantidad de componentes de la mezcla y los criterios de diseño que deben tenerse en cuenta en el proceso de fabricación son numerosos.

En la actualidad, la formulación de un *cemento a medida* (tailor made) a partir del proceso de molienda separada es un claro ejemplo de ello, pues las proporciones relativas de las componentes de la mezcla deben permitir luego obtener morteros y hormigones con el equilibrio justo entre los requerimientos durables, mecánicos, económicos y ecológicos que se soliciten.

La optimización por multicriterios ha sido empleada en el desarrollo de diversos materiales, sin embargo, su aplicación en la formulación del cemento no ha sido aún explorada. En este trabajo se presenta la optimización conjunta de la capacidad de absorción y la resistencia a compresión de hormigones elaborados con cemento Portland con caliza (hasta un 20%) y/o escoria granulada de alto horno (hasta un 20%) utilizando la función objetivo.

Palabras clave: cementos compuestos ternarios, caliza, escoria granulada de alto horno, optimización por multicriterios.

SUMMARY

Optimization methods are tools of vital importance in composite material design, where large numbers of components and design criteria must be taken into account.

The formulation of today's separately milled custom-made cements is a clear example of just such a case, for the components must be proportioned to yield mortars and concretes with the proper balance of durability, strength, financial and environmental features.

Multicriteria optimization has been used to develop many materials, although its application in cement formulation has yet to be explored. The present paper discusses the use of an objective function to jointly optimize sorptivity and compressive strength in limestone- (up to 20%) and/or granulated blast furnace slag- (up to 20%) added Portland cement concrete.

Keywords: ternary blend cements, limestone filler, granulated blast furnace slag, multicriteria optimization.

^(*) Universidad Nacional del Centro, Olavarría (Argentina).

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible impone la obligación de satisfacer las necesidades de la presente generación sin producir desechos, polución y el derroche de los recursos y el medio ambiente, de tal forma que las futuras generaciones tengan la posibilidad de cubrir sus propias necesidades (1). Desde hace algunos años la industria del cemento continúa incorporando y asimilando los cambios necesarios para fortalecer su desarrollo en un marco cada vez más sostenible.

Desde el punto de vista de la constitución del cemento Portland, el progresivo aumento en el uso conjunto de diferentes adiciones minerales (cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, caliza, humo de sílice, puzolanas, etc.) como reemplazo parcial de clínker Portland contribuye a la protección del medio ambiente, a través de la reducción en la emisión de CO₂ a la atmósfera y la reducción del consumo energético, sin desmejorar sus características tecnológicas (2). Por otra parte, desde el punto de vista de su fabricación, la utilización de combustibles alternativos conduce a un menor consumo de combustibles fósiles.

No obstante, si se considera que el mayor uso del cemento se destina a la elaboración de hormigón, no es correcto pensar que una vez finalizado el proceso de fabricación del mismo se ha cumplido totalmente con las leyes destinadas a preservar el medio ambiente. También debe considerarse que las estructuras que se diseñen y construyan otorguen un comportamiento durable adecuado en función de su propia vida útil. Pues toda estructura que deba regenerarse para su rehabilitación al poco tiempo de haberse construido ocasionará un gasto extra de energía y un mayor consumo de materia prima necesario para elaborar el cemento Portland a utilizar en las reparaciones, además del aumento en la cantidad de residuos.

En consecuencia, una industria del cemento sostenible no implica una industria del hormigón sustentable y, por ello, la formulación de los cementos a medida debe ser tomada en cuenta en el diseño del hormigón para que éste alcance el comportamiento esperado, en relación con el tipo de estructura, el destino de la misma, el lugar de emplazamiento, la vida útil requerida, etc.

Si se considera que actualmente el cemento Portland de mayor existencia en el mercado está constituido por una mezcla de por lo menos dos o más componentes en cantidades variables, el diseño de un hormigón hoy más que nunca requiere de la utilización de métodos de optimización que incluyan los diferentes requerimientos o criterios (dura- bles, mecánicos, económicos, ecológicos, etc.) que este material deba cumplir. La optimización por multicriterios aparece como una herramienta muy empleada en el desarrollo de diversas áreas (3-5), pero su aplicación en la formulación del cemento no ha sido aún explorada. En este

1. INTRODUCTION

Sustainable development is defined as the obligation to meet the present generation's needs without producing waste or pollution, dilapidating resources or damaging the environment, so as to enable future generations to meet theirs (1). Over the last few years, the cement industry has been incorporating and assimilating the changes needed to strengthen its development while intensifying its commitment to sustainability.

On the one hand, in terms of cement constituents, the steady increase in the joint use of different mineral additions (fly ash, blast furnace slag, limestone, silica fume, pozzolans and so on) as partial replacements for Portland clinker contributes to environmental protection by reducing CO₂ emissions and the energy consumed, without impairing the properties of the cement produced (2). And on the other, in terms of the manufacturing process, the use of alternative sources reduces fossil fuel consumption.

Since cement is primarily employed in concrete, however, environmental legislation should not be regarded to apply solely to its manufacture. It is equally important in this respect for structures to be designed and built to meet durability requirements in keeping with their service life. Indeed, the production of Portland cement to repair or rehabilitate structures shortly after construction entails extra expenditure in energy and prime materials, not to mention the additional waste generated.

In other words, a sustainable cement industry does not necessarily generate a sustainable concrete industry. Consequently, custom-made cement formulation is a factor to be borne in mind in concrete design to ensure attainment of expected performance in light of type of structure, use, location, service life and so on.

Given that the most common Portland cement on the market consists in a mixture of at least two or more components in varying proportions, today more than ever concrete design must deploy optimization methods able to address all the (durability, strength, financial, environmental and so on) requirements or criteria that the material should meet. Multicriteria optimization is a tool widely used in the development of a number of areas (3-5), but its application to cement formulation remains unexplored. The present paper discusses joint sorptivity and compressive strength optimization in Portland

trabajo se presenta la optimización conjunta de la capacidad de absorción y la resistencia a compresión de hormigones elaborados con cemento Portland que incluyen cantidades variables de caliza y escoria granulada de alto horno.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y proporciones de la mezcla: en este trabajo se utilizó un cemento Portland sin adición (CPN) con 58% de C_3S y 2% de C_3A y dos cementos Portland con caliza (CP12F y CP18F). Los cementos tienen una resistencia a compresión a 28 días de 45, 40 y 42 MPa, con una superficie específica de 321, 380 y 383 m^2/kg para contenidos de caliza de 0, 12 y 18%, respectivamente. La escoria granulada de alto horno se adicionó en peso del cemento teniendo la misma un módulo químico de $(C+M+A)/S$ de 1,8. El árido grueso utilizado fue piedra partida granítica con un tamaño máximo de 19 mm y como árido fino se usó una arena natural silíceo con módulo de finura de 2,35.

Proporciones de las mezclas: con los materiales antes descritos se elaboraron hormigones con 350 kg/m^3 de material cementante, relación agua/material cementante (a/mc) de 0,50 y relación árido fino/árido total de 0,45. Los contenidos de escoria adicionados fueron: 10% y 20% en el CP12F y CP18F; y 20% en el CPN. El curado de las probetas fue de 24 horas en el molde y después de desmoldadas se sumergieron en agua saturada con cal hasta cumplir la edad de ensayo de 28 días.

Metodología de ensayos: la resistencia a compresión se realizó sobre probetas cilíndricas (10 x 20 cm) de acuerdo a la norma IRAM 1546. Para el ensayo de absorción capilar (6), se utilizaron prismas de 10 x 15 x 15 cm. Cumplida la edad de ensayo, las muestras se secaron en estufa a 105 ± 5 °C durante 24 horas y luego se impermeabilizaron con una pintura bituminosa dejando un área sin cubrir de 100 cm^2 perteneciente a la cara de moldeo. El criterio usado para el análisis de la velocidad de absorción fue la cantidad de agua absorbida medida por la ganancia de masa. Con los resultados obtenidos en el ensayo se calculó la tasa de absorción (S), a partir de la gráfica de agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo (7).

Los resultados obtenidos en estado fresco y endurecido de los hormigones se encuentran desarrollados y discutidos en publicaciones previas (8, 9).

3. OPTIMIZACIÓN POR MULTICRITERIOS

La optimización por multicriterios es un método que permite la búsqueda en forma racional de una solución o grupo de soluciones tales que se satisfagan simultáneamente

cement concrete containing varying amounts of limestone and granulated blast furnace slag.

2. EXPERIMENTAL PART

Materials and mixture proportions: the materials used in this study included an unadditioned Portland cement (CPN) containing 58% C_3S and 2% C_3A , as well as two limestone-Portland blended cements (CP12F and CP18F). The 28-day compressive strength of the cements with 0, 12 and 18% limestone was, respectively, 45, 40 and 42 MPa, and their BET specific surface was 321, 380 and 383 m^2/kg . Granulated blast furnace slag with a $(C+M+A)/S$ chemical modulus of 1.8 was added by weight of cement. Crushed granite with a maximum particle size of 19 mm was used as the coarse aggregate, while the fines consisted in natural siliceous sand with a fineness modulus of 2.35.

Mixture proportions: the above materials were used to manufacture concrete with 350 kg/m^3 of cementitious material, a water/cementitious material (w/cm) ratio of 0.50 and a fine/coarse aggregate ratio of 0.45. Slag was added as follows: 10% and 20% to CP12F and CP18F and 20% to CPN. Specimens were cured in moulds for 24 hours and then immersed after demoulding in lime-saturated water until reaching the test age (28 days).

Test methodology: compressive strength was found with 10 x 20-cm cylindrical specimens pursuant to IRAM standard 1546. Prismatic specimens measuring 10 x 15 x 15 cm were used for the capillary absorption test (6). When the test age was reached, the specimens were oven dried at 105 ± 5 °C for 24 hours and then waterproofed with bituminous paint except for one 100- cm^2 patch. The criterion used to analyze the absorption rate was the amount of water absorbed, measured as weight gain. The test results were used to plot the amount of water absorbed vs the square root of time, from which graph sorptivity (S) was calculated (7).

The results obtained for the fresh mix and hardened concrete are given in prior papers (8, 9).

3. MULTICRITERIA OPTIMIZATION

Multicriteria optimization is a method for rationally seeking a solution or group of solutions that simultaneously meet different requirements or criteria, which may be related

diferentes requerimientos o criterios que pueden ser de índole mecánico, durable, ecológico, económico, etc. Su aplicación requiere de una apropiada selección de las *funciones decisivas* y de las *funciones objetivo*. La función decisiva es la expresión analítica que relaciona los factores del diseño con la respuesta del sistema estudiado, mientras que la función objetivo establece el rango de aceptabilidad de las respuestas involucradas en la optimización.

De acuerdo a ello, para optimizar una mezcla por multicriterios se requiere hallar previamente la función decisiva para cada uno de los criterios involucrados en el diseño. La expresión general de la función decisiva calculada a partir de un *Diseño Simplex* (10) para una mezcla de tres componentes ($X_1 + X_2 + X_3 = 100\%$) posee la forma de la ecuación [1]:

$$Y = b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad [1]$$

donde, Y es el criterio, X_1 , X_2 y X_3 representan los factores y $b_1 \dots b_{123}$ son los coeficientes del sistema.

Obtenidas las expresiones para cada uno de los criterios que se desea optimizar, se le asigna a cada uno de ellos una función objetivo $d_i(Y_i)$, cuya expresión adopta la forma de la ecuación [2] [3] o [4], dependiendo de si se busca maximizar, minimizar o asignarle un valor específico a dicho criterio (11), respectivamente.

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^{p_i} & \text{si } L_i < Y_i(x) < T_i \\ 1 & \text{si } Y_i(x) > T_i \end{cases} \quad [2]$$

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } Y_i(x) < T_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^{p_i} & \text{si } T_i < Y_i(x) < U_i \\ 0 & \text{si } Y_i(x) > U_i \end{cases} \quad [3]$$

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_i(x) < L_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^{p_i} & \text{si } L_i < Y_i(x) < T_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^{p_i} & \text{si } T_i < Y_i(x) < U_i \\ 0 & \text{si } Y_i(x) > U_i \end{cases} \quad [4]$$

donde L_i , U_i y T_i representan el mínimo, el máximo y un valor determinado deseable para la respuesta Y_i , con $L_i \leq T_i \leq U_i$ respectivamente, el exponente p_i constituye la importancia de obtener un resultado determinado. Cuando $p_i = 1$ la función objetivo se incrementa linealmente en dirección de T_i para $p_i < 1$, la función es convexa favoreciendo los

to strength, durability or environmental, financial or other considerations. Use of the method entails the suitable selection of decision and objective functions. A decision function is an analytical expression that relates design factors to the response of the system studied, while an objective function establishes the range of acceptability of the responses obtained.

Further to the above, before multicriteria optimization can be conducted, a decision function must be defined for each of the design criteria. The general expression for the design function computed from a Simplex Design (10) for a three-component mixture ($X_1 + X_2 + X_3 = 100\%$) adopts the following form equation [1]:

where Y is the criterion, X_1 , X_2 and X_3 are the factors and $b_1 \dots b_{123}$ are system coefficients.

Once all the expressions are obtained for the criteria to be optimized, an objective function $d_i(Y_i)$ is assigned to each, which adopts the form of equations ([2] [3] or [4], depending on whether the criterion is to be maximized, minimized or assigned a specific value, respectively (11).

where L_i , U_i and T_i respectively represent the minimum, maximum and specified desirable value for response Y_i , with $L_i \leq T_i \leq U_i$, while exponent p_i provides a measure of the importance of obtaining a certain result. When $p_i = 1$, the objective function rises linearly in direction T_i ; for $p_i < 1$ the function is convex, favouring values close

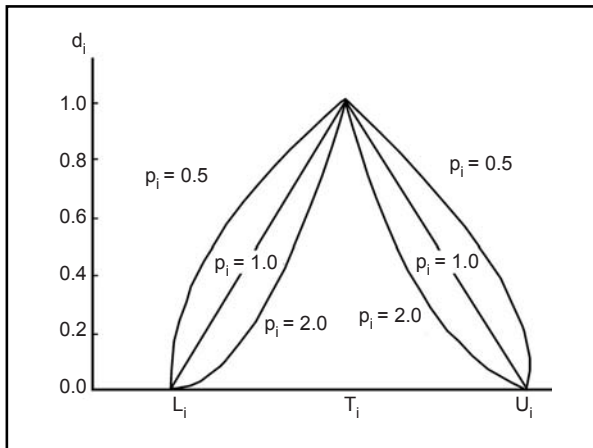


Figura 1. Funciones objetivas propuestas por Derringer (12) con diferentes pesos relativos.

Figure 1. Objective functions proposed by Derringer (12) with different relative weights.

valores cercanos a L_i y para $p_i > 1$, la función es cóncava y favorece los valores cercanos a U_i (Figura 1 (12)). Esta función puede tomar valores entre 0 y 1, $d_i(Y_i) = 0$ representa un valor de respuesta Y_i completamente indeseable y $d_i(Y_i) = 1$ representa un valor completamente deseable. La optimización de todos los criterios en forma simultánea se obtiene mediante la aplicación de la función objetivo general D que vincula todos los objetivos d_i individuales a través de su media geométrica de acuerdo a la ecuación [5]:

$$D = (d_1(Y_1)^{p_1} \cdot d_2(Y_2)^{p_2} \cdot \dots \cdot d_k(Y_k)^{1/(p_1 + p_2 + \dots + p_k)})^{1/p_k} \dots \quad [5]$$

donde $p_1 \dots p_k$ representan la importancia o peso relativo de cada una de las funciones objetivos $d_i(Y_i)$. Se puede observar en la expresión que si alguna de las respuestas es completamente indeseable, el valor del objetivo general D es nulo. Luego, el problema de la optimización por multicriterios se reduce a la maximización del valor D , que al igual que el valor individual $d_i(Y_i)$ puede variar entre 0 y 1, donde el valor 0 indica la inexistencia de una solución tal que permita cumplir con la totalidad de los criterios, mientras que el valor 1 indica que existe una solución para el nivel de multicriterio requerido.

Para aquellos valores de D distintos de 0 y 1 existe un nivel de interpretación dado por Harrington (13) para cada rango de valores como se muestra en la Tabla 1.

Por último la aplicación de esta metodología requiere:

- Ajustar un modelo para cada superficie de respuesta estudiada.
- Definir los valores individuales de la función objetivo para cada respuesta.
- Maximizar el objetivo general D con respecto a los factores controlables.

Tabla 1 / Table 1

Sistema de interpretación del valor del objetivo general D (13)
 Interpretation of the value of general objective D (13)

Rango / Range	Descripción / Description
1.00	El mayor nivel de satisfacción y calidad alcanzable <i>Highest attainable level of satisfaction and quality</i>
1.00 - 0.80	Excelente y aceptable / <i>Excellent and acceptable</i>
0.80 - 0.63	Aceptable y bueno / <i>Acceptable and good</i>
0.63 - 0.40	Aceptable pero pobre / <i>Acceptable but poor</i>
0.40 - 0.30	Límite de aceptabilidad / <i>Acceptability limit</i>
0.30 - 0.00	Inaceptable / <i>Unacceptable</i>
0.00	Completamente inaceptable / <i>Wholly unacceptable</i>

to L_i ; and for $p_i > 1$, the function is concave and favours values close to U_i (Figure 1 (12)). The value of this function ranges from 0 to 1, where $d_i(Y_i) = 0$ represents an entirely undesirable value for response Y_i and $d_i(Y_i) = 1$ represents an entirely desirable value. Simultaneous optimization of all the criteria is obtained by applying general objective function D , which links all the individual objectives d_i via their geometric mean in accordance with equation [5]:

where $p_1 \dots p_k$ are the relative weights of the various objective functions $d_i(Y_i)$. It will be noted from the expression that if any of the responses is entirely undesirable the value of general objective D is nil. Therefore, multicriteria optimization is ultimately a matter of maximizing the value of D which, like the individual values $d_i(Y_i)$, may vary from 0 to 1, where 0 indicates the non-existence of a solution in which all the criteria can be met, whereas 1 means that a solution can be found for the multicriteria level required.

Harrington (13) divided the values of D between 0 and 1 into ranges and provided an interpretation for each, as shown in Table 1.

Lastly, application of this methodology requires:

- Fitting a model for each response area studied.
- Defining the individual values of the objective function for each response.
- Maximizing general objective D with respect to the controllable factors.

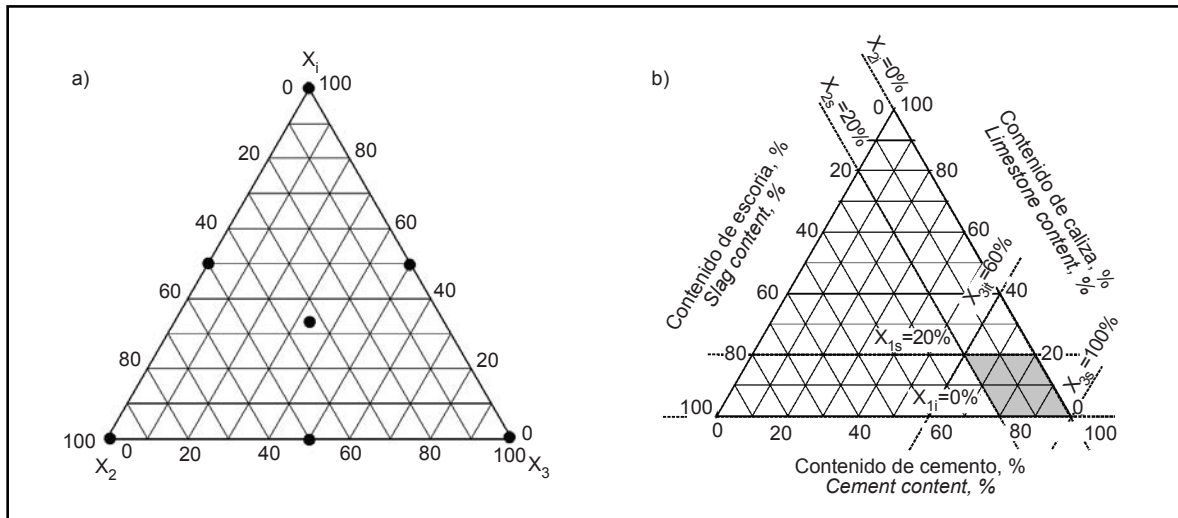


Figura 2. a) Puntos experimentales de un Diseño Simplex, b) Dominio experimental estudiado.
 Figure 2. a) Simplex Design experimental points; b) Experimental domain studied.

Tabla 2 / Table 2

Coefficientes de la función decisiva (ecuación [1]) para el criterio de tasa de absorción (S28) y resistencia a compresión (R28)
 Decision function (equation [1]) coefficients for sorptivity (S28) and compressive strength (R28) criteria

Criterio / Criterion	Coeficientes / Coefficient						
	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{13}	β_{23}	β_{123}
S ₂₈	1.81	1.45	0.10	-9.80	-1.87	-1.70	9.81
R ₂₈	-43.35	94.15	36.00	-361.54	94.19	-80.81	654.04

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO

El problema planteado en este ejemplo de aplicación consiste en hallar el conjunto de combinaciones de caliza (X_1), escoria granulada de alto horno (X_2) y cemento Portland (X_3) tal que los hormigones elaborados verifiquen simultáneamente los criterios de resistencia y de capacidad de absorción a la edad de 28 días. En la Tabla 2 se presentan los coeficientes de la ecuación [1] para cada uno de los dos criterios incorporados en la optimización. Estas expresiones fueron calculadas a partir de los siete puntos experimentales que determina la aplicación de un Diseño Simplex (Figura 2a) en el dominio experimental representado en la Figura 2b por $X_1 + X_2 \leq 40\%$, con $X_1 \leq 20\%$ y $X_2 \leq 20\%$. También se utilizó un octavo punto experimental para verificar el ajuste del modelo a través del cual se determinó que las diferencias entre los valores calculados y los valores experimentales en ningún caso superó el 5%.

Las Figuras 3a y 3b muestran las curvas de isorrespuestas de la resistencia (8) y de la capacidad de absorción (9) a 28 días, respectivamente.

Por ejemplo: se desea diseñar un hormigón H30 (resistencia característica (f'_{bk}) de 30 MPa) con un modo 1 de control de acuerdo al nuevo Reglamento Argentino

4. METHOD APPLICATION

The problem posed in this sample application consists in finding the set of combinations of limestone (X_1), granulated blast furnace slag (X_2) and Portland cement (X_3) with which the resulting concrete simultaneously meets 28-day sorptivity and compressive strength requirements. Table 2 gives the equation [1] coefficients for the two criteria to be optimized. These expressions were computed from the seven experimental points determined by applying a Simplex Design (Figure 2a) to the experimental domain represented by $X_1 + X_2 \leq 40\%$ in Figure 2b, subject to $X_1 \leq 20\%$ and $X_2 \leq 20\%$. Model verification, based on an eighth experimental point, showed that the differences between the computed and the experimental values were consistently less than or equal to 5%.

The strength (8) and sorptivity at 28 days (9) iso-response contours are given in Figures 3a and 3b.

Example: design a control mode 1 H30 concrete (characteristic strength (f'_{bk}) 30 MPa) pursuant to new Argentine code CIRSOC 201/05 (according to the code, this mode

CIRSOC 201/05 (14) (bajo este modo, el Reglamento considera que la planta elaboradora de hormigón acredita aseguramiento de calidad) y, además, el hormigón debe registrar un índice de durabilidad excelente estimado a partir de la capacidad de absorción ($< 3 \text{ mm/h}^{0.5}$). Este límite a la tasa de absorción es especificado por Ho *et al.* (15), considerando una estructura que estará sometida a una lluvia de 24 horas y en la cual la penetración de agua no debe ser mayor a 15 mm durante este período.

El buen comportamiento del hormigón frente a los dos criterios mencionados queda definido en función de los límites admisibles que se establezcan para cada uno de ellos; conceptualmente, esto implica asegurar que la mezcla alcance una mínima resistencia a compresión y una máxima capacidad de absorción. En virtud de ello, se debe adoptar para cada criterio la función objetivo tal que maximiza la resistencia a compresión, y minimiza la capacidad de absorción, teniendo en cuenta que ambas propiedades se consideran con la misma importancia ($p_i = 1$). La Tabla 3 muestra los límites para cada uno de los criterios incluidos en la optimización.

Después, aplicando la función objetivo general D (ecuación [5]), se obtiene la optimización de ambos criterios en forma simultánea. La Figura 4 muestra las curvas de isorrespuestas pertenecientes al valor D en función de los factores X_1 y X_2 (contenido de caliza y escoria granulada de alto horno, respectivamente).

En la misma es posible observar que no existe hormigón alguno tal que satisfaga total y simultáneamente ambos criterios, pues el máximo valor que alcanza la función objetivo D es de sólo 0,88 correspondiente al punto experimental $X_1 = 5\%$ y $X_2 = 6\%$, esto es, un hormigón elaborado con un cemento Portland conteniendo 5% de caliza y 6% de escoria granulada de alto horno. Sin embargo, existe una

*means that the concrete plant is quality assurance-certified) with excellent durability as estimated by its sorptivity ($< 3 \text{ mm/h}^{0.5}$). According to Ho *et al.* (15), at the foregoing sorptivity limit water penetration in a structure exposed to rain for 24 hours will not exceed 15 mm.*

Good concrete performance in the above respects is defined in terms of the allowable limits established for each criterion. Conceptually, this entails ensuring that the mix attains a certain minimum compressive strength and does not exceed a certain maximum sorptivity. In other words, the objective functions adopted should maximize compressive strength and minimize sorptivity, with the two properties regarded to carry equal weight ($p_i = 1$). The limits for the optimization criteria are given in Table 3.

Subsequently, general objective function D (equation (5)) is applied to optimize the two criteria simultaneously. Figure 4 shows the iso-response contours for the value of D in terms of factors X_1 and X_2 (limestone and granulated blast furnace slag content, respectively).

As the figure shows, there is no concrete able to wholly and simultaneously meet both criteria, for the highest value found for function D is only 0.88, specifically at experimental point $X_1 = 5\%$ and $X_2 = 6\%$: i.e., concrete made with Portland cement containing 5% limestone and 6% granulated blast furnace slag. There is, however, a wide region where the value of the objective function

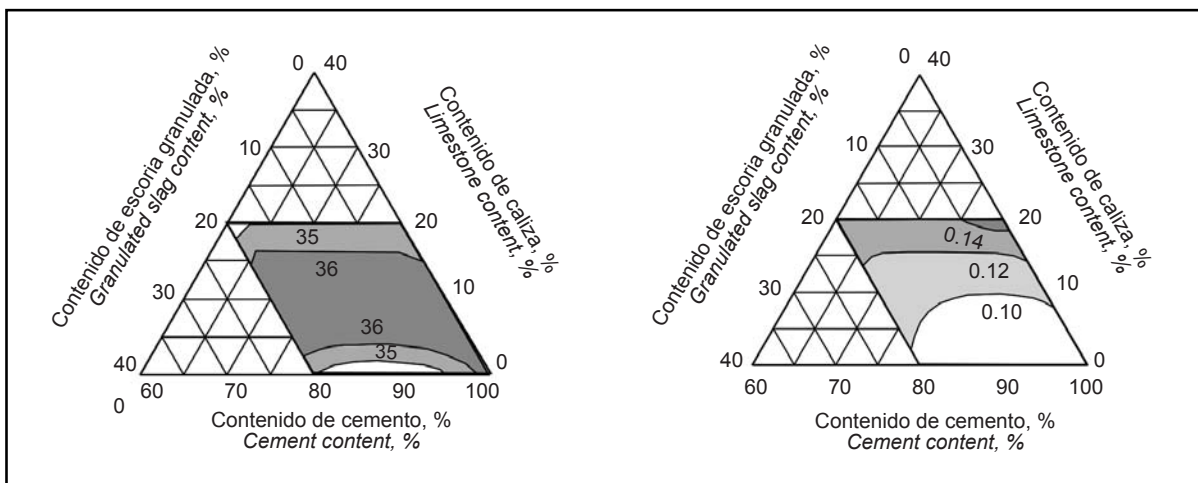


Figura 3. Curvas de isorrespuestas del dominio estudiado a 28 días. a) Resistencia a compresión y b) Capacidad de absorción.
 Figure 3. 28-day iso-response contours for the domain studied. a) Compressive strength and b) sorptivity.

Tabla 3 / Table 3
Valores límites establecidos para el ejemplo de aplicación
Limits established for the sample application

Criterios / Criterion	Límite inferior, L_i / Lower limit, L_i	Límite superior, U_i / Upper limit, U_i
Resistencia a compresión / Compressive strength	34.0 MPa	36.9 MPa
Tasa de absorción / Sorptivity	0.08 g/cm ² h ^{1/2}	0.13 g/cm ² h ^{1/2}

amplia región donde la función objetivo posee un valor mínimo de 0,80 y en la cual es posible elegir una mayor gama de combinaciones de X_1 y X_2 tales que los hormigones elaborados correspondan a un rango excelente de acuerdo a la clasificación dada en la Tabla 1. El máximo reemplazo de clínker Portland para el cual aún se obtiene un hormigón con un valor de $D \geq 0,80$ se obtiene para valores de $X_1 + X_2$ de 22,5%, con $X_1 = 5$ y $X_2 = 17,5\%$. Luego la decisión final entre las posibles combinaciones será función de la disponibilidad y el costo de cada uno de los componentes.

Por otra parte, el valor máximo de caliza que admite dicha región es del 10% confirmando el rango óptimo de inclusión de este material establecido en trabajos anteriores (16-19). En la Figura 4b puede observarse que cuando la función objetivo D es menor de 0,80, el comportamiento de los hormigones frente a ambos criterios depende casi exclusivamente del contenido de caliza, pues las isorrespuestas ubicadas en esta zona se tornan paralelas a los contenidos de X_1 .

5. CONSIDERACIONES FINALES

En un material como el *cemento a medida* que necesariamente debe satisfacer en forma simultánea los cada vez más crecientes requerimientos de los hormigones

is at least 0.80, affording a broader range of combinations of X_1 and X_2 able to produce concretes in the excellent category as per the classification set out in Table 1. The maximum replacement value of Portland clinker from which concrete with $D \geq 0.80$ can be obtained is 22.5%, with $X_1 = 5\%$ and $X_2 = 17.5\%$. The final choice of the most suitable combination will, therefore, be based on component availability and cost.

Moreover, the maximum value for X_1 within the $D \geq 0.80$ region, 10%, confirms the findings on optimum limestone content reported in previous studies (16-19). As Figure 4 shows, when objective function D is under 0.80, concrete performance in terms of both criteria depends nearly exclusively on the limestone content, for the iso-response contours in this area are parallel to the X_1 content.

5. FINAL COMMENTS

In a material such as custom-made cement which must necessarily and simultaneously meet growing numbers of requirements, the use of tools to analytically determine

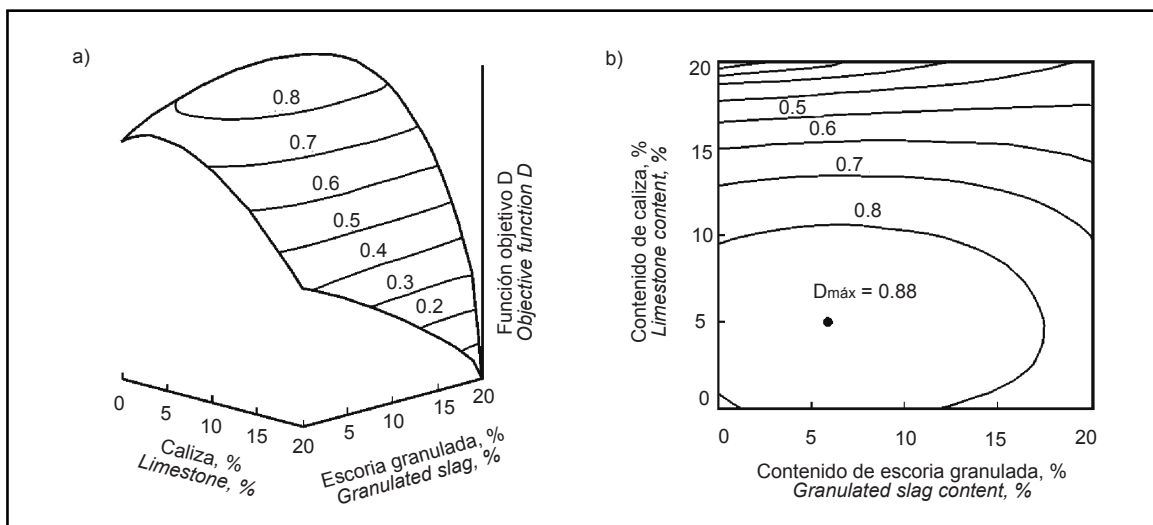


Figura 4. Curvas de isorrespuestas de la función objetivo D. a) tridimensional y b) bidimensional.
Figure 4. a) three-dimensional and b) two-dimensional iso-response contours for objective function D.

que componen, hace imprescindible la utilización de herramientas que permitan hallar analíticamente su composición más conveniente. Pues, abordar dicha tarea mediante el recurso de la *prueba y error* conduce a una extremada cantidad de trabajo experimental y en muy pocas ocasiones brinda alguna solución. Más aún, si se tiene en cuenta la amplia gama de posibilidades a partir de las diferentes combinaciones de adiciones minerales actualmente utilizadas como reemplazo parcial del clínker Portland. Adicionalmente, el empleo de la optimización por multicriterios a través de la inclusión de funciones objetivo permite encontrar combinaciones de las componentes del cemento que si bien no verifican totalmente los criterios impuestos ($D = 1$), poseen un grado de validez asociado brindado por el valor D .

Por último, la optimización por multicriterios en el futuro será de utilidad toda vez que el estudio de otros subproductos, que seguramente el continuo avance de la sociedad se encargará de producir, encuentren en el cemento Portland un sitio donde alojarse.

the most suitable composition is imperative. The alternative, adopting a trial and error approach, leads to an inordinate amount of experimental work that, moreover, seldom yields a solution. The problem is accentuated by the wide variety of possible combinations of mineral additions presently used as partial replacements for Portland clinker. Furthermore, with of multicriteria optimization based on objective functions, combinations of cement components can be found that, while not wholly verifying the criteria established ($D = 1$), attain valid and acceptable D values.

Lastly, multicriteria optimization will be useful in future whenever studies find Portland cement to be a viable destination for new by-products that society, in its ongoing evolution, is certain to generate.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (PICT97 12-00000-01323) y la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

ACKNOWLEDGEMENTS

The present study was funded by the National Agency for the Furtherance of Science and Technology (PICT97 12-00000-01323) and the Science and Technology Secretariat of the National University, Centre, of the province of Buenos Aires.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Swamy, R. N.: "Sustainable concrete for infrastructure regeneration and reconstruction", *Proc. International Conference on Sustainable Construction*. Edited by N. Barbosa, R. Swamy and C. Lynsdale (200), pp. 15-44.
- (2) Malhotra, V. M.: "Role of Supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions", *Proc. Int. Conference on Infrastructure Regeneration and Rehabilitation- Improving the Quality of Life through better Construction-A Vision for the Next Millennium*, Ed. R.N. Swamy, Sheffield Academics Press (1999), pp. 27-42.
- (3) Klemm, A. J. y Marks, W.: "Multicriteria optimisation of polymer modified composites subjected to freezing and thawing cycles", *Buildings and Environment*, vol. 34 (1999), pp. 368-375.
- (4) Marks, W.: "Multicriteria optimisation of shape of Energy-Saving buildings", *Buildings and Environment*, vol. 32, nº 4 (1997), pp. 331-339.
- (5) Tzeng, G., Teng, M., Chen, J. y Opricovic, S.: "Multicriteria selection for a restaurant location in Taipei", *International Journal of Hospitality Management*, vol. 21 (2002), pp. 171-187.
- (6) Camarini, G., Balayssac, J. P. y Detriché, Ch.: "Influence of cement type and curing conditions on initial absorption of concrete", *Proc. 2º CANMET/ACI International Conference*, ACI SP-186, Gramado, Brazil (1999), pp. 427-431.
- (7) Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E.: "Absorción capilar en hormigones con cemento compuesto", *Revista Hormigón*, nº 38 (2001), pp. 25-34.
- (8) Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E. F.: "Hormigones con cementos ternarios. Parte I: Estado fresco y propiedades mecánicas", *Mater. Construcc.*, vol. 56, nº 284 (2006), pp. 56-67.
- (9) Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E. F.: "Hormigones con cementos ternarios. Parte II: Mecanismos de transporte", *Mater. Construcc.*, vol. 285, nº 285 (2007), pp. 31-43.
- (10) Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E. F.: "Diseños experimentales: su aplicación en la tecnología del hormigón", *Revista Hormigón*, nº 39 (2003), pp. 17-27.
- (11) Cahya, S.: *Sampling properties of optimal operating conditions of single and multiple response surface systems*, Thesis in Industrial Engineering, The Pennsylvania State University, 2002, p. 198.

- (12) Derringer, G. y Suich, R.: "Simultaneous optimization of several response variables", *Journal of Quality Technology*, vol. 12, nº 4 (1980), pp. 214-219.
- (13) Harrington, E. C.: *The desirability function*, Industrial Quality Control, abril (1965), p. 494.
- (14) *Reglamento CIRSOC 201*: Reglamento Argentino de estructuras de Hormigón, 2005.
- (15) Ho, D. W., Hinczak, I., Conroy, J. J. y Lewis, R. K.: "Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete", *Proceedings, Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Concrete*. ACI SP 91-72, Madrid, España, 1986, pp. 1463-1473.
- (16) Bonavetti, V. L.: *Cementos con filler calcáreo. Mecanismo de interacción y su influencia sobre la resistencia*, Tesis MSc. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 1998, p. 242.
- (17) Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Cabrera, O., Donza, H. y Menéndez, G.: "Mechanical properties and durability of concrete made with portland limestone cement", *Three-Day International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology*, 16-19 de septiembre, San Francisco, USA. ACI Special Publication 202-27, V.M. Malhotra *et al.* Eds., 2001, pp. 431-450.
- (18) Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E. F.: "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composite*, vol. 25, nº 1 (2003), pp. 57-63.
- (19) Carrasco, M. F., Menéndez, G., Bonavetti, V. L. e Irassar, E. F.: "Strength Optimization of "Tailor Made Cement" with Limestone Filler and Blast Furnace Slag", *Cement and Concrete Research*, vol. 35 (2005), pp. 1324-1331.

* * *