

PROPOSICIÓN DE UN NUEVO MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE MORTEROS DE MÁXIMA COMPACIDAD BASADO EN EL AUMENTO DE VOLUMEN

PROPOSITION OF A NEW METHOD FOR PROPORTIONING MORTARS OF MAXIMUM COMPACTNESS BASED ON THE INCREASING OF VOLUME

Autores: **Ricardo Giani Del Ch.**, Constructor Civil, gianir@puc.cl, Profesor Auxiliar
Andrés Solas A., Doctor Ing. Caminos Canales y Puertos, asolas@puc.cl, Profesor Titular
Pablo Maturana B., Doctor Ing. Caminos Canales y Puertos, pmaturan@puc.cl, Profesor Titular
Jaime Bustos M., M.Sc. Civil Engineering, jabumen@puc.cl, Profesor Titular
 Escuela de Construcción Civil, Facultad de Ingeniería,
 Pontificia Universidad Católica de Chile

Fecha de recepción : 09/03/2004

Fecha de aceptación : 29/04/2004

RESUMEN

La presente investigación se enmarca en el estudio de criterios de diseño para la formulación de un modelo de dosificación para morteros y hormigones, tomando en consideración la máxima compactidad posible de obtener en relación a una docilidad deseada y características mecánicas predeterminadas. Teniendo presente lo anterior se formula un modelo matemático que permite dosificar, en una primera etapa, mezclas para morteros.

Esta etapa de la investigación, que se presenta en esta publicación se limita al diseño de morteros de cemento. Una próxima etapa se abocará a extrapolar los resultados obtenidos en conjunto con otros ensayos que permitirán la formulación de un nuevo método de dosificación de hormigones.

Los resultados obtenidos para morteros, permiten proponer una novedosa herramienta de diseño, que considera variables como superficie específica de la arena, masa de la arena, grado de cemento, relación agua/cemento, módulo de finura de la arena.

Las ecuaciones finales, obtenidas estadísticamente, permiten relacionar dichas variables con densidad máxima, cono reducido, flow-test, resistencia a compresión y a flexotracción.

Los resultados así obtenidos han sido contrastados con métodos tradicionales de dosificación, obteniéndose una correlación aceptable en casi todas las variables.

Palabras Claves: Mortero (de cemento) – Dosificación – Máxima Compactidad.

ABSTRACT

The present research is related with the study of criterias for dosage formulations, looking for a model to proportioning mortars and concretes. Taking in account the maximum compactness possible to obtain in relation to a wished consistency and predetermined mechanical characteristic, a mathematical model is presented to allow proportioning. The model in this stage is valid only for using in the design of cement mortar.

A next stage will be carried out to extrapolate the obtained results, together with other tests to allow the formulation of a new method of concrete dosage.

The results obtained for mortars, allow the proposal of a novel tool for designing, that considers variables like specific surface of sand, mass of sand, cement degree, water/cement relation, fineness module of the sand.

The final equations, statistically obtained, allows to relate these variables with maximum density, reduced cone, flow-test, compressive strength and flexural strength.

The results obtained in this way were contrasted with others obtained with traditional methods of proportioning, getting themselves an acceptable correlation in almost all the variables.

Keywords: Cement Mortar – Proportioning (dosage) – Maximum Compactness.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de aumento de volumen

Cuando a un volumen de arena compactada, saturada superficialmente seca, se le agrega una pequeña cantidad de pasta de cemento, muy inferior a su contenido de huecos, se puede observar que el volumen de mortero resultante, compactado, es siempre mayor al inicial de arena, independientemente de la energía de compactación y de la razón agua/cemento utilizada.

Si se repite el ensayo varias veces, incrementando paulatinamente el volumen de pasta, agregado a una misma cantidad de arena, el volumen de mortero resultante inicialmente crece rápidamente con cada incremento de pasta, hasta un valor máximo que depende de la energía de compactación, del tipo de arena y de la relación A/C utilizado. Sobre este primer límite, los incrementos posteriores de pasta no alteran el volumen de mortero resultante, incluso lo reducen ligeramente. Esto último, producto de una mayor facilidad de eliminación del aire atrapado para una determinada energía de compactación constante, hasta un nuevo límite, sobre el cual vuelven a producirse incrementos de volumen, directamente proporcionales y aproximadamente iguales al volumen de pasta agregado.

En el Gráfico 1, se esquematiza el comportamiento del mortero, para una energía de compactación constante, observado experimentalmente.

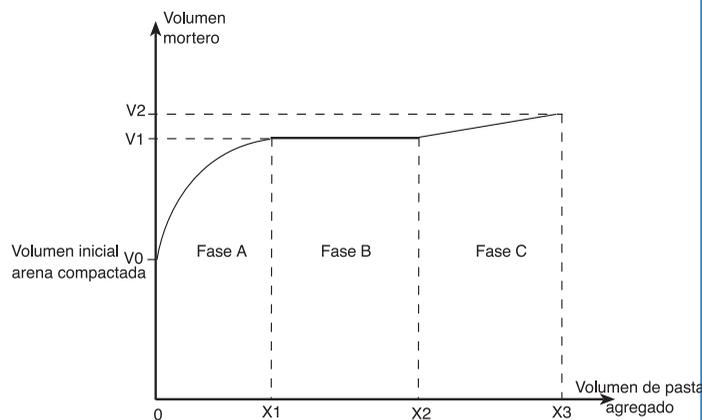


Gráfico 1: Aumento de volumen de mortero en función del volumen de pasta de cemento utilizada (Fuente propia).

El comportamiento observado: aumento de volumen en la fase A, estabilización en la fase B y finalmente un nuevo incremento de volumen en la fase C, se puede explicar si se acepta que:

- Inicialmente, fase A, la pasta de cemento rodea los granos de arena formando una envoltura en torno a cada grano, cuyo espesor debiera ser uniforme e independiente del diámetro de las partículas del árido, ya que la energía libre, existente en la superficie de los granos, es unitariamente constante. El incremento de diámetro, generado por las envolturas de pasta, aumenta la distancia entre los centros de los granos de arena, dando origen a un aumento de volumen y consecuentemente a un incremento del volumen absoluto de huecos, lo que se mantiene constante como porcentaje del volumen resultante de mortero.

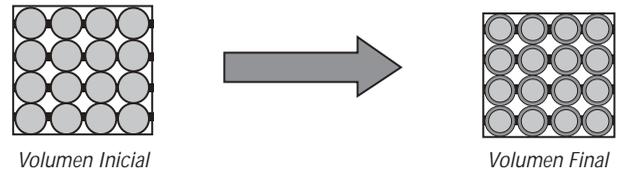


Figura 1. Esquema del aumento de volumen.

- El fenómeno de aumento de volumen descrito, para dosis de pasta bajas y una energía de compactación constante, se sobrepone al aumento de volumen producido por el aire atrapado.
- Sólo cuando todos los granos de arena se han rodeado de una capa de pasta, compatible con la energía disponible en su superficie, empiezan a llenarse los huecos existentes, fase B. En esta fase, la densidad del mortero fresco y por consiguiente la relación, volumen compactado obtenido/volumen absoluto de sus componentes, crece con cada aumento de la dosis de pasta, incrementando la capacidad del mortero fresco resultante.
- Una vez obtenida la máxima compacidad, compatible con la energía de compactación utilizada, tipo de arena y relación A/C, las dosis adicionales de pasta agregadas vuelven a producir pequeños incrementos de volumen, directamente proporcionales al volumen de pasta agregado en exceso. En esta fase C, el mortero adquiere una docilidad creciente a medida que aumenta la dosis de pasta, debido al reemplazo de arena por pasta en cada unidad de volumen y paralelamente se reduce al mínimo el porcentaje de aire atrapado.

Lo explicado anteriormente tiene importantes implicancias en el diseño de dosificaciones de mortero, las que no han sido consideradas en ningún modelo de dosificación actualmente en uso, ya que establece un marco analítico que

permite determinar la dosis de pasta necesaria para obtener la máxima compactación del mortero resultante, y definir la dosis adicional de pasta requerida para lograr una docilidad predeterminada, compatible, con una relación A/C, tipo de arena y energía de compactación, predeterminadas.

De acuerdo con lo anterior, si no se considera el aire atrapado, para lograr la máxima compactación de un mortero sería necesario utilizar el volumen de pasta de cemento, determinado por la siguiente relación:

$$V_p = V_h + R_a * S_e * M_a + \Delta V_h$$

donde:

- V_p = Volumen de pasta necesaria para obtener la máxima compactación
- V_h = Volumen de huecos de la arena
- R_a = Espesor de pasta que los granos son capaces de retener
- S_e = Superficie específica de la arena por unidad de masa
- M_a = Masa de arena
- ΔV_h = Aumento de volumen

2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Sobre la base del aumento de volumen encontrado y aceptando como posible la explicación indicada en el punto anterior, se plantean las siguientes hipótesis que permiten desarrollar un nuevo modelo de dosificación de mortero, en función de la máxima compactación, compatible con una docilidad y resistencias mecánicas predeterminadas.

- Debido a la formación de una envoltura de pasta en torno de los granos de arena, para lograr la máxima densidad de un mortero, compatible con una energía de compactación y una relación A/C, predeterminadas. Debe considerarse necesariamente un volumen de pasta superior al volumen de huecos inicial de la arena.
- Aceptando que la energía disponible en la superficie de los granos es constante por unidad de superficie, el incremento de volumen por efecto de la formación de la envoltura de pasta indicada se relaciona directamente con la superficie específica de la arena utilizada.
- Como los huecos de la arena se empiezan a rellenar sólo después de que todos sus granos se hayan rodeado de

una fina capa de pasta, la compactación y densidad del mortero resultante sólo empieza a incrementarse durante la fase B, debiéndose encontrar la máxima densidad en una zona cercana al punto (X2, V1) del Gráfico 1.

- En la zona de máxima densidad, el mortero fresco necesariamente tiene baja docilidad, debido al pequeño espesor de pasta que rodea los granos de arena, lo que hace necesario considerar un volumen de pasta adicional, fase C, que se relaciona directamente con la relación A/C, superficie específica de la arena y docilidad requerida. Durante esta fase la densidad del mortero tiende a decrecer, debido a que en cada unidad de volumen existe una mayor cantidad de pasta. Sin embargo, este fenómeno se ve parcialmente compensado por una mayor facilidad para eliminar el aire atrapado, el que debe tender paulatinamente a valores mínimos. Consecuentemente, la relación **volumen aparente obtenido/volumen absoluto de los componentes del mortero debe tender a 1, desapareciendo el efecto de aumento de volumen. Los granos de arena se encuentran dispersos en una matriz de pasta de cemento.**

Sobre la base de lo expuesto, la dosis de pasta por unidad de volumen de arena requerida para obtener una docilidad predeterminada puede representarse por la siguiente relación:

$$V_p = V_h + \Delta V_h + R_a * S_e * M_a + R_b * S_e * M_a$$

o bien:

$$V_p = V_h + \Delta V_h + (R_a + R_b) * S_e * M_a$$

siendo :

R_a el espesor de pasta que rodea los granos, relacionado directamente con la superficie específica de la arena utilizada;

R_b el incremento de la distancia entre granos necesario para lograr la docilidad requerida, cuyo valor depende de la relación A/C utilizada.

2.1 Procedimiento de cálculo de R_a y R_b

Para simplificar el problema, se supone un cubo inicial de arena compactada de arista M, donde los granos de arena, aproximadamente esféricos y de diámetro 2R, están ordenados por capas en contacto, como se muestra en la Figura 1.

El volumen inicial del cubo de arena, sin pasta, es evidentemente M^3 . Considerando que la arista de longitud M , del cubo, está formada por N granos de arena de diámetro $2R$, entonces el volumen inicial del cubo puede expresarse como:

$$V_i = 8 * N^3 * R^3$$

Una vez mezclada la arena con una cantidad de pasta, suficiente para formar una envolvente, de espesor δ , alrededor de todos los granos de arena, el diámetro de los granos de arena+pasta, pasa de $2R$ a $(2R+\delta)$ y consecuentemente el nuevo volumen del cubo está dado por:

$$V_f = 8 N^3 * (R+\delta)^3 = 8 N^3 * (R^3 + 3R^2\delta + 3R\delta^2 + \delta^3)$$

así, el incremento de volumen total ΔV_t es igual a $V_f - V_i$

$$\Delta V_t = 8 N^3 * (R^3 + 3R^2\delta + 3R\delta^2 + \delta^3) - 8 N^3 R^3$$

$$\Delta V_t = 8 N^3 * (R^3 + 3R^2\delta + 3R\delta^2 + \delta^3 - R^3) = 8 N^3 * (3R^2\delta + 3R\delta^2 + \delta^3)$$

Por otra parte, el volumen de pasta que rodea las N^3 partículas de arena que conforman el cubo (V_{p1}), supuestas perfectamente esféricas, está dado por:

$$V_{p1} = N^3 \left[\frac{4\pi * (R + \delta)^3}{3} - \frac{4\pi R^3}{3} \right]$$

$$V_{p1} = \frac{4\pi * N^3}{3} \left[3R^2\delta + 3R\delta^2 + \delta^3 \right]$$

Consecuentemente, la relación entre el incremento de volumen que sufre el cubo original de arena y el volumen de pasta que rodea los granos, puede expresarse como:

Relación Nº 1

Si se acepta que:

$$V_p = V_h + \Delta V_h + V_{p1}$$

Es decir, el volumen de pasta para máxima compactación es igual al volumen de huecos más el incremento de volumen de huecos y el volumen de pasta que envuelve la arena.

De lo anterior se puede establecer, en forma aproximada, el espesor de pasta que los granos son capaces de retener, en función de la dosis de pasta para máxima densi-

dad obtenida experimentalmente según se indica en la siguiente relación:

Relación Nº 2

Determinado R_a , puede calcularse R_b sobre la base de

$$R_a * S_e * M_a = \frac{\pi * \Delta V}{6}$$

$$R_a = \frac{\pi * \Delta V}{6 * S_e * M_a}$$

los incrementos de pasta utilizados experimentalmente para lograr las distintas docilidades en función de las diferentes relaciones A/C empleadas.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Variables independientes consideradas

Cemento. Se consideraron dos tipos de cemento: Portland Puzolánico de grado Corriente y Portland Puzolánico de grado Alta Resistencia, finura Blaine para el grado corriente 4.300 cm^2/g y para el grado AR 5.200 cm^2/g .

Áridos. Se utilizaron tres tipos de arena, proveniente de plantas, que cumplieran los requisitos generales indicados en la norma NCh 163 "Áridos para morteros y hormigones", las que se clasifican como gruesa, intermedia y fina.

Constantes Físicas	Arena		
	Fina	Intermedia	Gruesa
Densidad neta (kg/m^3)	2.730	2.740	2.740
Densidad real (kg/m^3)	2.605	2.630	2.640
Densidad aparente compactada (kg/m^3)	1.712	1.785	1.860
Porcentaje de finos (%)	2,35	1,71	1,41
Porcentaje de huecos (%)	34,30	31,80	29,60

GRANULOMETRÍAS

Tamiz	Abertura	Arena Fina		Arena Intermedia		Arena Gruesa	
		Retenido	Pasa	Retenido	Pasa	Retenido	Pasa
Nº	mm	%	%	%	%	%	%
3/8	10	0	100	0	100	0	100
4	5	0	100	2	98	12	88
8	2,5	6	94	16	84	36	64
16	1,25	17	83	33	67	53	47
30	0,63	38	62	52	48	68	32
50	0,31	69	31	78	22	85	15
100	0,16	91	9	93	7	96	4
200	0,08	100	0	100	0	100	0
Módulo Finura		2,23		2,73		3,52	
Se (m^2/kg)		6,46		5,09		3,51	

Cálculo aproximado de la superficie específica de las arenas utilizadas

El cálculo matemático de la superficie específica de la arena se realizó sobre la base del peso retenido, X_i , en cada tamiz, suponiendo los granos de arena perfectamente esféricos y con una distribución de tamaño uniforme.

Aceptando las limitaciones impuestas, puede estimarse que el diámetro medio de los granos retenidos en un tamiz de abertura Z_i , es igual a la media aritmética de las aberturas de los tamices Z_i y Z_{i-1} .

Para granos perfectamente esféricos, con $R=D/2$, se puede calcular el volumen y la superficie de cada grano:

$$V_i = (4 \pi * R^3)/3 \quad y \quad S_i = 4 \pi * R^2$$

y el peso de un grano:

$$P_i = V_i * d_{real} \quad (\text{Volumen} * \text{densidad real})$$

Consecuentemente el número de granos contenido en el peso X_i , retenido en el tamiz Z_n , es igual a:

$$N_i = X_i / P_i \quad y \quad Se_i = S_i * N_i$$

Finalmente, la superficie específica de toda la arena, retenida en la serie de tamices de abertura Z_1 a Z_n está dada por:

$$Se = \sum_{i=1}^{i=n} Se_i$$

Cabe mencionar que la superficie específica por unidad de peso, obtenida por el procedimiento desarrollado, se mantiene constante si se consideran los granos de arena como pequeños cubos de arista a , igual a $2R$ medio, lo que parece indicar que, dentro de ciertos límites, la superficie específica es independiente de la forma de los granos.

Dosis de pasta. Con cada tipo de cemento y de arena, se utilizaron diferentes dosis de pasta: 250, 300, 350, 450, 550, 650, 750 y 850 cm^3 , incorporada a una masa constante de arena, equivalente a un volumen compactado de 965 cm^3 (S.S.S). Las dosis que no permitieron una trabajabilidad aceptable no se consideraron.

Relación A/C. Para cada dosis de pasta se utilizaron las siguientes relaciones A/C: 0,40 - 0,44 - 0,46 - 0,48 - 0,50

- 0,52 - 0,54 - 0,56 - 0,58 - 0,60 - 0,65 - 0,70 - 0,75 - 0,80 - 0,85 - 0,90 - 0,95 y 1,0.

CUADRO DE VARIABLES INDEPENDIENTES

Variables independientes	Categorías de variación	Nivel de medición
Tipo de arena	Gruesa - Intermedia - Fina	De razón
Tipo de cemento	Corriente - Alta Resistencia	Nominal
Razón A/C	0,4 a 1,0	De razón
Dosis de pasta	250 a 850 cm^3	De razón

3.2 Variables dependientes analizadas

CUADRO DE VARIABLES DEPENDIENTES

Variables dependientes	Categorías de variación	Nivel de medición
Aumento de volumen	cm^3	De razón
Densidad	kg/m^3	De razón
Cono Reducido	cm	De razón
Flow-test	cm	De razón
Resistencia a Flexión	MPa	De razón
Resistencia a Compresión	MPa	De razón

4. METODOLOGÍA UTILIZADA

Para materializar todas las combinaciones entre las variables independientes indicadas se realizaron aproximadamente 600 morteros de prueba diferentes, los que se repitieron 3 veces, a fin de obtener datos estadísticamente confiables.

Todos los ensayos fueron realizados en los laboratorios de DECON, utilizando los procedimientos indicados en las normas chilenas correspondientes.

Cada mortero se confeccionó agregando a una masa de arena constante, equivalente a un volumen fijo de 965 cm^3 , cantidades crecientes de pasta de cemento, confeccionadas con distintas relaciones A/C, de acuerdo al programa de evaluación de las variables independientes indicado en el punto anterior.

Dado que en la realización de los ensayos se obtuvieron morteros excesivamente secos y otros extremadamente fluidos, para la presente investigación, se limitó el análisis a los morteros que se encontraban dentro del rango de medición de la mesa de sacudidas, ensayo Flow-test, desechando los fácilmente disgregables y los fluidos que excedían del rango de medición, considerando que los morteros dentro de este rango son los frecuentemente utilizados.

4.1 Medición de las variables independientes

Cemento: las dosis de cemento utilizadas se midieron mediante la masa equivalente, contenida en cada volumen de pasta a ensayar, con una balanza electrónica de precisión 1g.

Agua: se utilizó agua potable, medida con una precisión de 1 cm³, en la cantidad determinada por la relación agua/cemento y la dosis de pasta a utilizar en cada ensayo.

Áridos: en los morteros se utilizó la masa de arena equivalente a un volumen compactado S.S.S. de 965 cm³ constante, medido en peso con precisión de 1 g.

4.2 Procedimientos utilizados para determinación de las variables dependientes

Los morteros se prepararon en una mezcladora de dos velocidades, provista de rotación satelital, de acuerdo a lo indicado en la norma NCh 158.

4.2.1 Ensayos de compresión y flexotracción

Las muestras fueron confeccionadas en briquetas RILEM, (4*4*16 cm), compactadas en mesa vibradora de oscilación vertical de 1 ciclo/segundo y amplitud de 15 mm, de acuerdo al procedimiento especificado en la norma.

Las muestras se mantuvieron en cámara húmeda a 20°C y HR superior al 95% hasta la fecha de ensayo.

4.2.2 Ensayo de densidad real

La determinación en el mortero fresco se realizó conforme a la norma vigente.

4.2.3 Volumen de huecos y aire atrapado

Se determinó mediante el cociente entre la densidad absoluta teórica del mortero y la densidad compactada del mortero resultante, según la siguiente relación:

$$\Delta V = 1 - \frac{D_R}{D_T}$$

donde:

D_R = Densidad real del mortero fresco, determinada experimentalmente.

D_T = Σ materiales utilizados para obtener un litro de mortero.

4.2.4 Ensayos de docilidad

Para determinar la docilidad del mortero fresco resultante se utilizaron dos procedimientos, Cono reducido y Flow-test, de acuerdo a los procedimientos de ensayo indicados en las normas NCh 2257/1 y NCh 2257/3, comparando sus resultados.

5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

5.1 Densidad y aumento de volumen

De los resultados obtenidos para la variable dependiente densidad, en función de la dosis de pasta utilizada, relación A/C, tipo de arena y tipo de cemento, cuyos gráficos se presentan mas adelante, puede concluirse:

- Independientemente del tipo de cemento y relación A/C utilizados, la máxima densidad y consecuentemente compactación del mortero fresco, se obtiene con dosis de pasta superiores al volumen de huecos de la arena utilizada.
- Para la arena denominada gruesa, la dosis de pasta necesaria para lograr la máxima compactación del mortero fresco, compatible con la energía de compactación utilizada, fue 350 cm³, considerando un volumen inicial de arena compactada de 965 cm³.
- Análogamente, para 965 cm³ de arena fina, la dosis de pasta utilizada para obtener la máxima densidad del mortero fresco fue de 450 cm³ y en la arena intermedia una dosis del orden de 400 cm³. En este último caso la ausencia de datos intermedios hace imposible una mayor precisión.

Cálculo de Ra (espesor de capa que rodea los granos), sobre la base de los valores obtenidos.

Aceptando las dosis de pasta de 350, 400 y 450 cm³ para las arenas gruesa, intermedia y fina respectivamente, se puede calcular ΔV y Ra utilizando las relaciones deducidas en 2.1:

$$\Delta V = \frac{V_p - V_h}{(V_h / 1.000) + \pi / 6}$$

reemplazando para la arena gruesa, los valores:

- Para 965 cm³ de arena compactada: $V_p = 350 \text{ cm}^3$
- Para 1 l de arena compactada: $V_p = 350/0,965 = 362,69 \text{ cm}^3$
- $V_h = 296 \text{ cm}^3$ (29,6%)
- $S_e = 3,5077 \text{ m}^2/\text{kg}$
- Densidad = 1.860 kg/m³

se tiene:

$$\Delta V = \frac{362,69 - 296}{0,296 + 0,523} = 81,43 \text{ cm}^3 \quad \text{y} \quad Ra = \frac{3,14 * 81,43}{6 * 35.077 * 1,86} = \frac{255,69}{391.459} = 0,000653 \text{ cm}$$

Análogamente, para arenas fina e intermedia se obtiene:

ΔV Arena Fina = 142,40 cm³

ΔV Arena intermedia = 114,49 cm³

Ra Arena Fina = 0,000673 cm

Ra Arena intermedia = 0,000659 cm

Los valores obtenidos aparentemente demuestran que el espesor de la capa de pasta, que necesariamente rodea los granos de arena, es constante y consecuentemente independiente del diámetro de los granos y de la relación A/C utilizada, pudiendo estimarse un espesor medio aproximado de 0,00066 cm.

Aceptando como posible el valor de Ra obtenido, puede calcularse la dosis de pasta mínima, necesaria para obtener la máxima compactidad del mortero fresco.

Arena Fina - Cemento Corriente

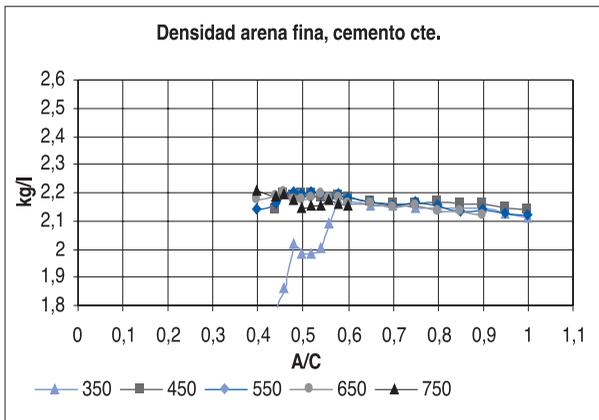


Gráfico 5.1.1. Fuente propia

Arena Fina - Cemento Alta Resistencia

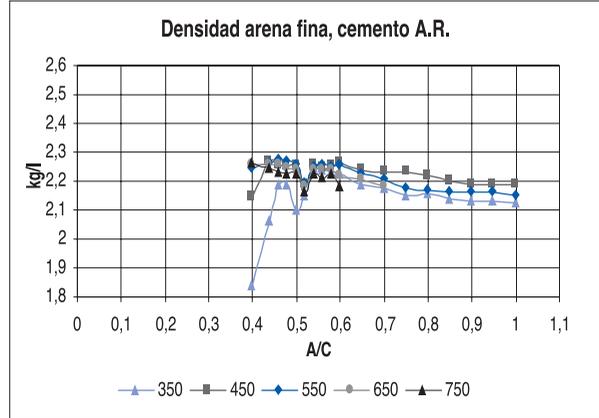


Gráfico 5.1.2. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Corriente

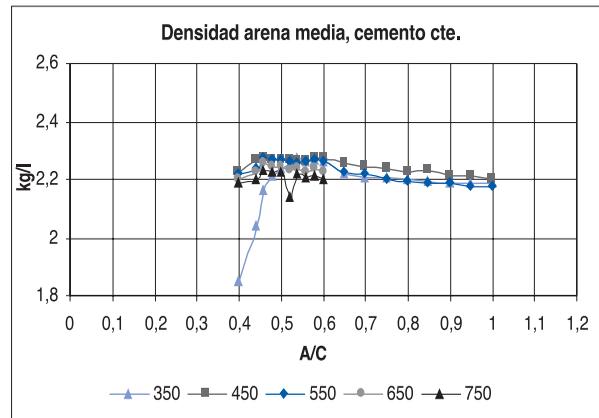


Gráfico 5.1.3. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Alta Resistencia

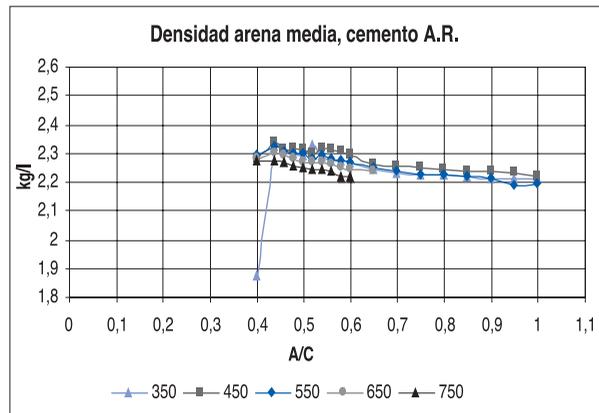


Gráfico 5.1.4. Fuente propia

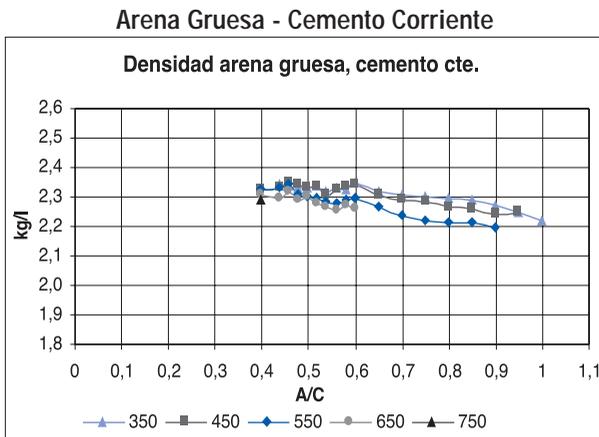


Gráfico 5.1.5. Fuente propia

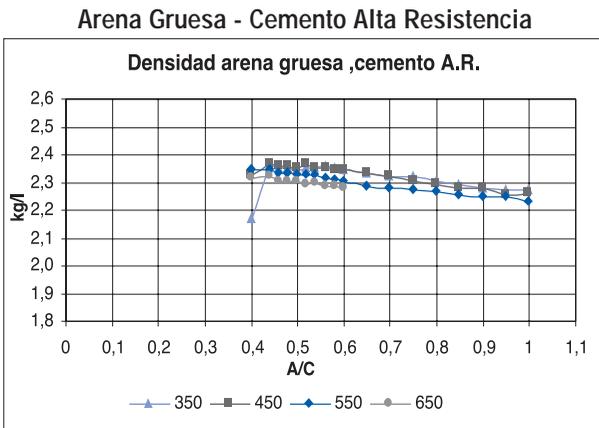


Gráfico 5.1.6. Fuente propia

5.2 Modelos estadísticos

Sobre la base de los resultados obtenidos se elaboraron modelos estadísticos multivariantes que explican en forma simple y adecuada el comportamiento de las variables dependientes, a través de las variables independientes. Para el análisis se utilizó el programa estadístico MINITAB. Las relaciones obtenidas con este modelo se validaron analizando la varianza de los coeficientes del modelo (ANOVA) y a través de las pruebas de hipótesis, normalidad del residuo, autocorrelación y homocedasticidad.

5.2.1 Modelo estadístico de la densidad del mortero fresco resultante

El modelo estadístico, obtenido por regresión, que explica el comportamiento de la variable densidad en función de las variables independientes utilizadas, para dosis de pasta (cemento+agua), iguales o superiores a la dosis mínima necesaria para rellenar los huecos de la arena utilizada, se puede representar por la siguiente relación:

$$D_R = (2.600 - 32,3 * T_c - 23 * Ma * Se - 186,9 * A/C - 0,108 * Cpt) \text{ g/l}$$

D_R = Densidad aparente compactada del mortero fresco
 T_c = Grado del cemento utilizado; $T_c = 1$, grado corriente y $T_c = 0$, grado A.R.

Ma = Masa de 1 litro de arena compactada en kg

Se = Superficie específica de la arena en m^2/kg

Cpt = Dosis de pasta en litros, para 1 litro de arena

A partir del test de Student, aplicado a cada uno de los coeficientes del modelo, a fin de comprobar su significancia, se obtiene:

Variable	Coefficiente	Desviación estándar	t	p
μ	2600	16,97	374,24	0,000
T_c	-32,3	1,91	-16,92	0,000
$Se * Ma$	-23	1,91	-41,96	0,000
A/C	-186,9	0,836	-30,13	0,000
Cpt	-0,1044	0,00814	-12,83	0,000

Para un nivel de significancia del 5%, las variables indicadas son todas significativas, por lo que sus coeficientes no pueden tender a 0.

S = 19,31	R² = 89,8 %	R² Ajustado = 89,7 %
------------------	-------------------------------	--

El valor de R^2 encontrado indica, para este tipo de investigación, una buena asociación lineal de las variables.

Para cada coeficiente, el intervalo de confianza, dentro del cual se encuentra el 95% de los resultados posibles, para los límites ensayados, está dado por:

Valor estimado del coeficiente ± Desviación estándar indicada en el cuadro

5.2.2 Modelos de docilidad

5.2.2.1 Cono reducido

Sobre la base de los resultados encontrados, que se presentan en los Gráficos 5.2.1 al 5.2.6, el modelo que explica el comportamiento del cono reducido en función de las variables independientes consideradas, es el siguiente:

$$Co = (-15,4 - 0,82 * Se * Ma + 13,7 * A/C + 32,5 * Cpt)$$

donde:

- Co = Cono reducido en cm
- Se = Superficie específica por kg de arena en m²
- Ma = Masa de 1 litro de arena compactada en kg
- A/C = Relación agua/cemento utilizada
- Cpt = Dosis de pasta para un volumen de arena compactada de 1 litro, en litros

De lo anterior, se deduce que la dosis de pasta total, necesaria para obtener el asentamiento de cono deseado, puede expresarse como:

$$C_{pt} = \frac{Co + 16,4 + 0,87 * Se * Ma - 14,4 * A / C}{33,5}$$

consecuentemente, la dosis de pasta, en exceso de la necesaria para lograr la máxima compactación está dada por:

$$\Delta C_p = C_{pt} - C_p$$

Del test de Student,

Variable	Coefficiente	Desviación estándar	t	p
m	-15,4	0,8389	-19,55	0,000
Se * Ma	-0,82	0,0593	-14,6	0,000
A/C	13,73	0,744	19,34	0,000
Cpt	32,48	0,91	36,91	0,000

S = 1,907	R ² = 80,0 %	R ² Ajustado = 79,8 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

Las pruebas indicadas y las de residuo validan los coeficientes del modelo.

Arena Fina - Cemento Corriente

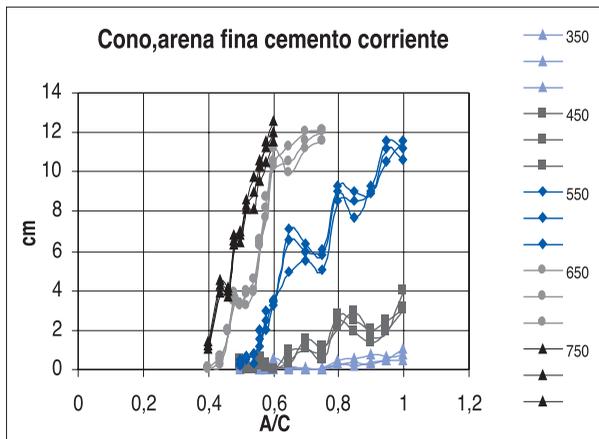


Gráfico 5.2.1. Fuente propia

Arena Fina - Cemento Alta Resistencia

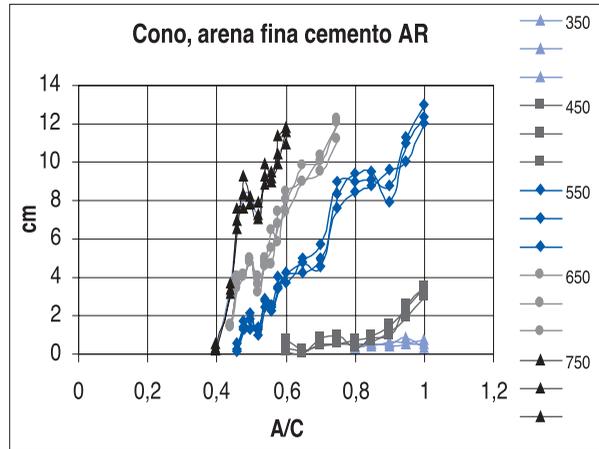


Gráfico 5.2.2. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Corriente

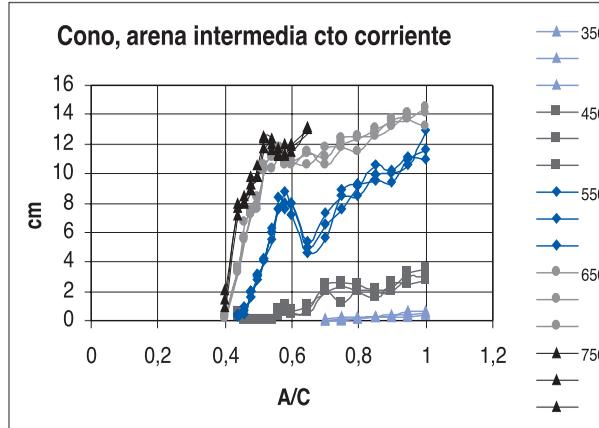


Gráfico 5.2.3. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Alta Resistencia

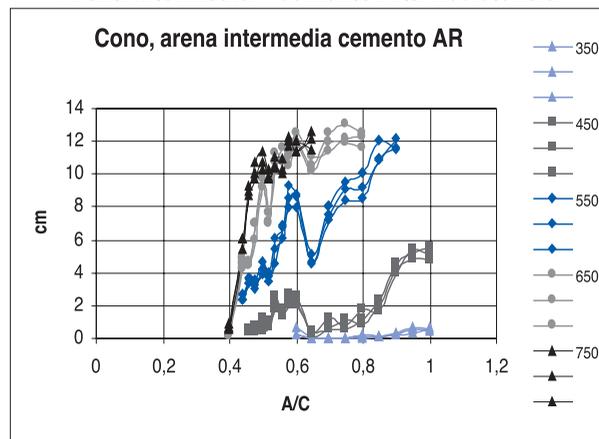


Gráfico 5.2.4. Fuente propia

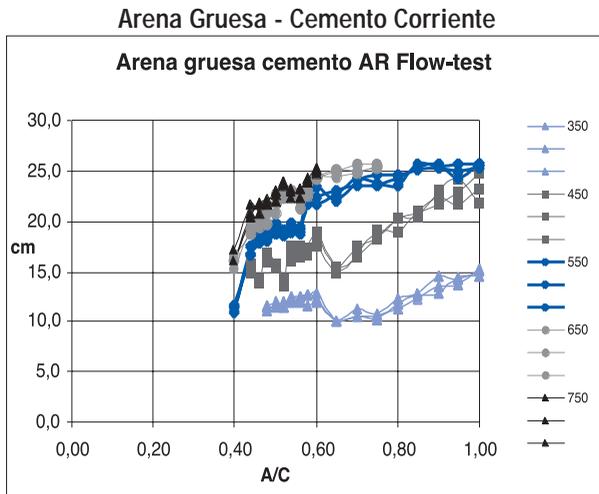


Gráfico 5.2.5. Fuente propia

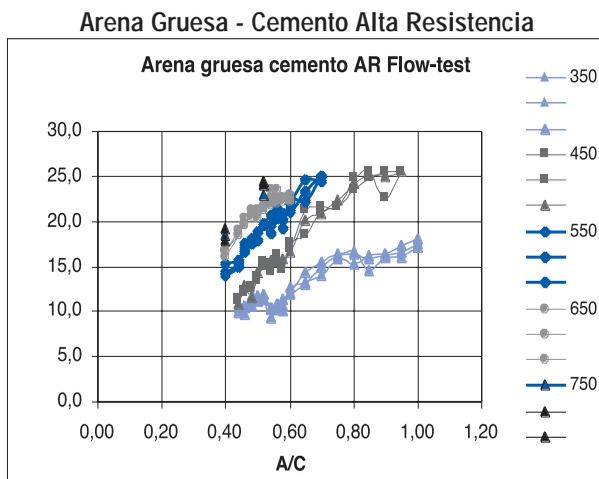


Gráfico 5.2.6. Fuente propia

5.2.2.2 Flow-test

El modelo estadístico, que representa los resultados del ensayo Flow-test obtenidos, Gráficos 5.3.1 al 5.3.6, puede expresarse como sigue:

$$Ft = (0,684 + 0,530 Tc - 0,463 * Se * Ma + 14,8 * A/C + 24,4 Cpt)$$

Ft = Flow-test (cm)

Tc = Grado del cemento utilizado; Tc = 1, grado corriente y Tc = 0, grado A.R.

Se*Ma = Superficie específica de la masa, para 1 l de arena compactada, en m²

Cpt = Litros de pasta para 1 litro de arena compactada

De la validación del modelo, se tiene:

Variable	Coficiente	Desviación estándar	t	p
μ	0,684	0,0799	0,86	0,000
Se*Ma	-0,463	0,0558	-8,33	0,000
A/C	14,79	0,6152	24,04	0,000
Cpt	264,4	0,940	24,76	0,000
Tc	0,5295	0,1833	2,89	0,000

S = 1,534	R ² = 75,5 %	R ² Ajustado = 75,2 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

5.2.2.3 Análisis de los modelos de docilidad

Aceptando los coeficientes de los modelos obtenidos se puede concluir:

- La docilidad del mortero resultante es directamente proporcional a su contenido de pasta de cemento y relación A/C.
- La docilidad del mortero resultante es inversamente proporcional a la superficie específica del árido utilizado.
- El tipo de cemento utilizado afecta ligeramente los resultados del ensayo Flow-test y no tiene relevancia en el ensayo de cono (p >> 0,05, por lo que existe una alta probabilidad que el coeficiente sea 0).

Comparando ambos modelos:

Variable	CONO			FLOW-TEST		
	Coficiente	L.C. Inferior	L.C. Superior	Coficiente	L.C. Inferior	L.C. Superior
Se*Ma	-0,87	-0,811	-0,9293	-0,463	0,3740	0,5520
A/C	14,38	13,636	15,124	14,79	14,1748	15,4052
Cpt	33,5	32,59	34,41	24,4	23,462	25,338
Tc				0,5295	0,3462	0,7128

Arena Fina - Cemento Corriente

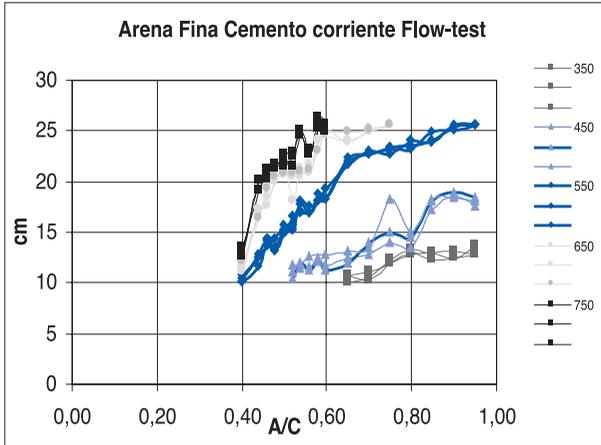


Gráfico 5.3.1. Fuente propia

Arena Fina - Cemento Alta Resistencia

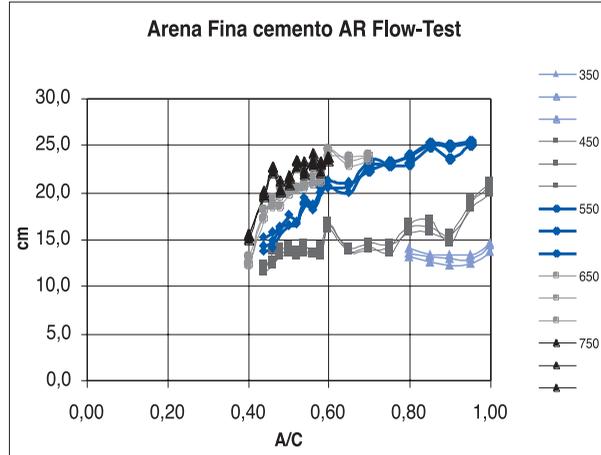


Gráfico 5.3.2. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Corriente

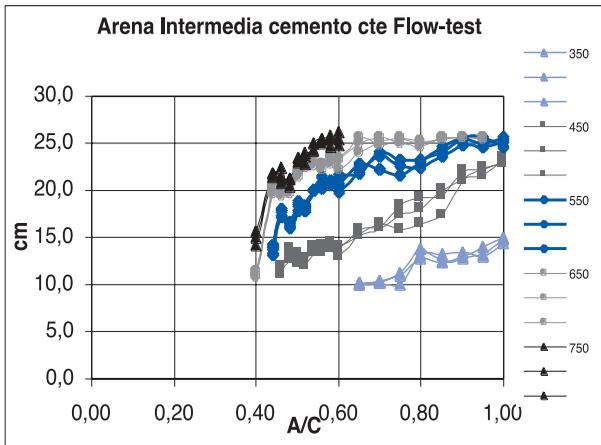


Gráfico 5.3.3. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Alta Resistencia

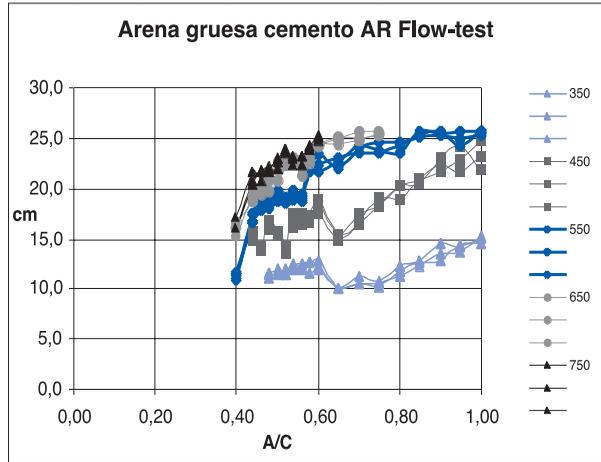


Gráfico 5.3.4. Fuente propia

Arena Gruesa - Cemento Corriente

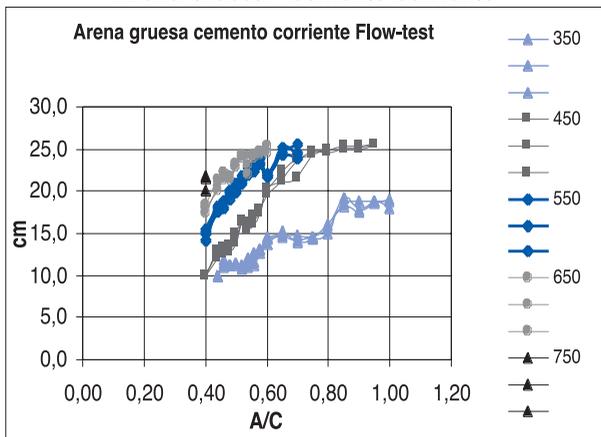


Gráfico 5.3.5. Fuente propia

Arena Gruesa - Cemento Alta Resistencia

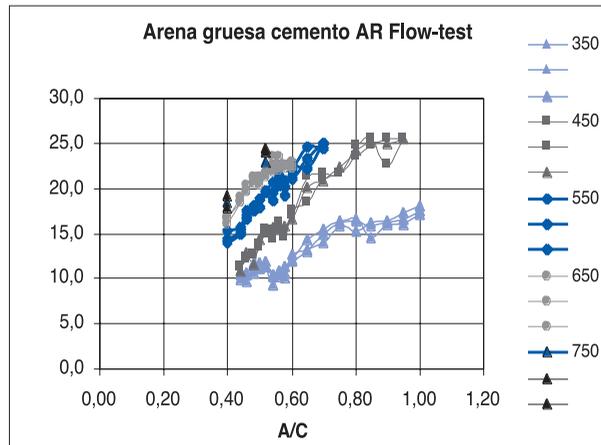


Gráfico 5.3.6. Fuente propia

Para intervalos de confianza del 95% los coeficientes que afectan las variables independientes tienen un comportamiento similar en ambos ensayos, sin embargo el ensayo de cono reducido presenta una mayor sensibilidad a las variaciones de composición del mortero, especialmente en el caso de la dosis de pasta y superficie específica.

Considerando el alto número de resultados disponibles se intentó correlacionar ambos ensayos obteniéndose la siguiente relación:

$$C_o = -15,6 + 1,04 F_t$$

S = 2,259	R ² = 64,1 %	R ² Ajustado = 64,0 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

Para este análisis sólo se consideraron los morteros con Flow-test superior a 150 mm, ya que la norma NCh 2257/3 establece que el ensayo sólo tiene validez para resultados iguales o mayores al indicado.

La correlación obtenida, entre ambos ensayos, es relativamente baja, lo que parece indicar que los ensayos correlacionados no miden exactamente la misma propiedad del mortero resultante o al menos no tienen la misma sensibilidad a los cambios de composición del mortero y consecuentemente no serían equivalentes.

5.2.3 Resistencias mecánicas

5.2.3.1 Compresión simple

Sobre la base de los resultados encontrados (Gráficos 5.4.1 al 5.4.6), se propone el siguiente modelo de predicción de resistencia a compresión, obtenido por regresión multivariable:

$$R_c = 75,4 - 12,2 T_c - 0,40 (S_e * M_a) - 50 A/C$$

R_c = Resistencia a compresión a 28 días (MPa)
 T_c = Grado del cemento utilizado; T_c = 1, grado corriente y T_c = 0, grado A.R.
 S_e*M_a = Superficie específica de la masa, para 1 l de arena compactada, en m².

Variable	Coficiente	Desviación estándar	t	p
μ	75,451	1,488	50,70	0,000
Se*Ma	-0,40	0,0418	-2,99	0,002
A/C	-50,31	1,638	-31,71	0,000
Tc	-12,1662	0,4952	-25,17	0,000

S = 4,927	R ² = 82,0 %	R ² Ajustado = 81,8 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

El modelo determinado demuestra que la resistencia a compresión es independiente de la cantidad de pasta utilizada y que la superficie específica total del árido utilizado tiene una escasa incidencia en los resultados. De lo que se deduce que la resistencia a compresión del mortero depende fundamentalmente del grado de cemento utilizado y de su razón A/C.

5.2.3.2 Flexotracción

El modelo que representa la resistencia a flexotracción encontrado, en función de las variables independientes consideradas, queda definido por la siguiente relación:

$$R_f = 11,5 - 0,676 * T_c - 0,190 (S_e * M_a) - 5,77 * A/C + 1,51 * C_{pt}$$

R_f = Resistencia a flexotracción a 28 días (MPa)
 T_c = Grado del cemento utilizado; T_c = 1, grado corriente y T_c = 0, grado A.R.
 S_e*M_a = Superficie específica de la masa, para 1 l de arena compactada, en m²
 C_{pt} = Litros de pasta para 1 litro de arena compactada.

Variable	Coficiente	Desviación estándar	t	P
μ	11,541	0,3848	30,01	0,000
Se*Ma	-0,190	0,0669	-6,15	0,000
A/C	-5,772	0,3560	-16,21	0,000
Tc	-0,6755	0,1069	-6,32	0,000
Cp	1,51	0,4318	3,49	0,01

S = 1,060	R ² = 51,4 %	R ² Ajustado = 51,0 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

La baja correlación obtenida demuestra claramente que el modelo encontrado no representa adecuadamente el comportamiento de la resistencia a flexotracción. Probablemente esto es debido a que este tipo de ensayo es fuertemente influido por variables difícilmente controlables o no consideradas, como por ejemplo la adherencia entre árido y pasta de cemento, el grado de microfisuración en los bordes de grano y pequeñas irregularidades de la probeta, entre otras.

A pesar de la baja relación obtenida es posible establecer una correlación empírica entre los resultados de resistencia a compresión y a flexotracción obtenidos en las mismas probetas.

Arena Fina - Cemento Corriente

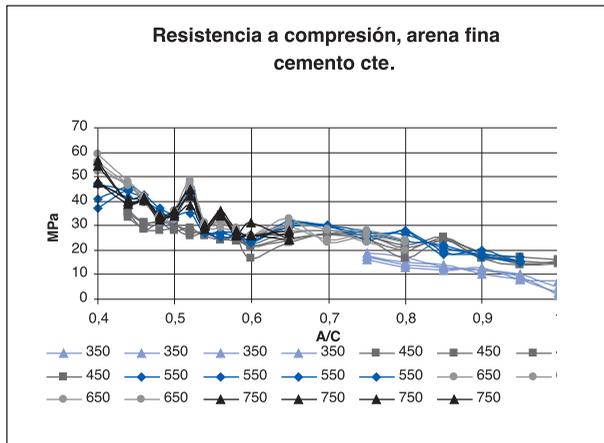


Gráfico 5.4.1. Fuente propia

Arena Fina - Cemento Alta Resistencia

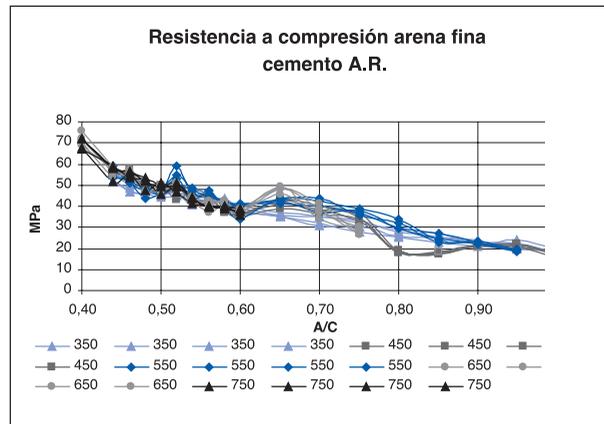


Gráfico 5.4.2. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Corriente

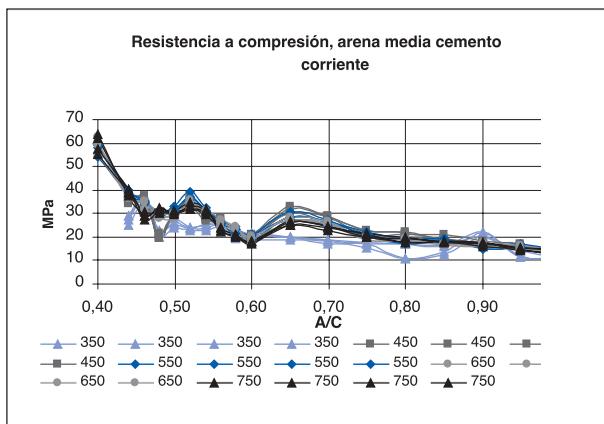


Gráfico 5.4.3. Fuente propia

Arena Intermedia - Cemento Alta Resistencia

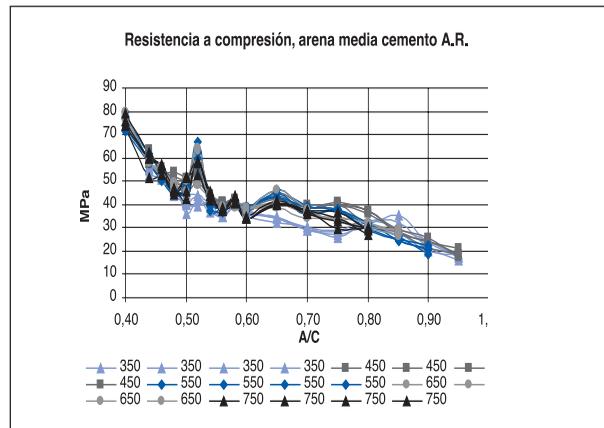


Gráfico 5.4.4. Fuente propia

Arena Gruesa - Cemento Corriente

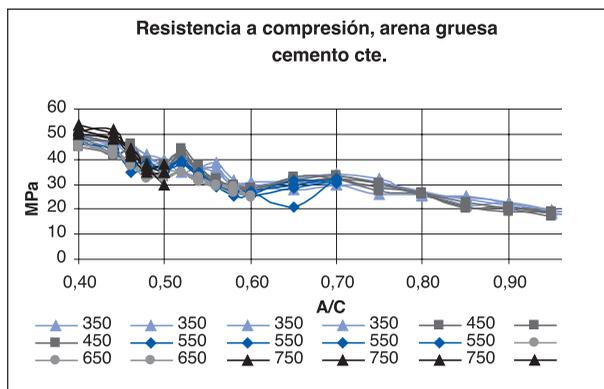


Gráfico 5.4.5. Fuente propia

Arena Gruesa - Cemento Alta Resistencia

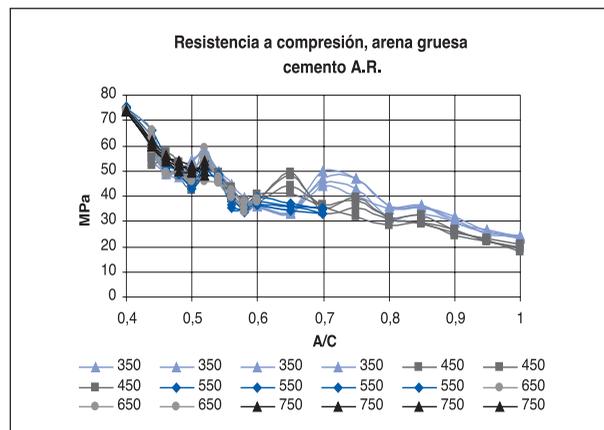


Gráfico 5.4.6. Fuente propia

El modelo propuesto que relaciona ambos ensayos es el siguiente:

$$R_f = 0,153 R_c + 1,914$$

Variable	Coefficiente	Desviación estándar	t	P
μ	-12,535	1,693	-7,40	0,000
Rf	6,533	0,234	27,92	0,000

S = 6,058	R ² = 70,7 %	R ² Ajustado = 70,0 %
-----------	-------------------------	----------------------------------

Los valores de correlación de aproximadamente un 70% que se han obtenido, están dentro de un rango aceptable para este tipo de investigación.

6. ECUACIONES PARA DOSIFICAR

Las relaciones encontradas permiten proponer un sistema de dosificación de morteros de máxima compacidad que además cumpla con los requerimientos de resistencia y docilidad, propios de cada obra.

Por otra parte, como estas relaciones se han obtenido a través de un análisis estadístico, cada uno de los coeficientes propuestos presenta un cierto valor de desviación estándar propio, lo que, por el lado de la seguridad, hace recomendable dosificar utilizando el valor de cada coeficiente correspondiente a su límite de control más desfavorable.

Aceptando esto, las relaciones corregidas que permiten dosificar son:

$$D_m = (2.583 - 34 * T_c - 25 * S_e * M_a - 188 * A/C - 0,116 * C_{pt}) \text{ kg/m}^3$$

$$C_o = (-16,4 - 0,87 * S_e * M_a + 14,4 * A/C + 33,5 * C_{pt}) \text{ cm}$$

$$F_t = (0,56 + 0,35 T_c - 0,52 * S_e * M_a + 14,2 * A/C + 23,5 C_{pt}) \text{ cm}$$

$$R_c = 74 - 12,5 T_c - 0,4 (M_a * S_e) - 52 A/C \text{ [MPa]}$$

$$R_f = (11 - 0,78 * T_c - 0,25 (S_e * M_a) - 6,12 * A/C + 1,08 * C_{pt}) \text{ MPa}$$

Para facilitar el cálculo de la superficie específica, en esta investigación, se ha intentado relacionar dicho valor con el módulo de finura del árido fino utilizado, analizando los datos obtenidos de una muestra consistente en 100 granulometrías diferentes, realizadas en los laboratorios del DECON.

Los resultados obtenidos por regresión, sobre esta base de datos, permiten proponer la siguiente relación:

$$S_e = 12,672 - 2,755 MF \text{ (m}^2/\text{kg)}$$

S = 0,1259	R ² = 93,8 %	R ² Ajustado = 93,7 %
------------	-------------------------	----------------------------------

Si bien existe una elevada correlación entre el módulo de finura y la superficie específica, calculada por el sistema indicado en el punto 3.1, cabe hacer presente que la relación propuesta es particularmente válida para módulos de finura comprendidos entre 2 y 3,5, rango dentro del cual entrega valores muy cercanos a los calculados y va perdiendo progresivamente precisión para módulos de finura superiores.

6.1 Ejemplo de dosificación

6.1.1 Datos de entrada

Especificación:

$$R_c = 15 \text{ MPa} \quad C_o = 5 \text{ cm} \quad \text{Cemento corriente (T}_c=1)$$

Datos de la arena a utilizar:

$$\text{Densidad real (d}_{\text{real}}) = 2,70 \text{ kg/l}$$

$$\text{Densidad compactada seca (d}_{\text{compactada}}) = 1,79 \text{ kg/l}$$

$$\text{Huecos} = 33,7 \%$$

$$MF = 2,8$$

6.1.2 Cálculo de la dosificación

Superficie específica arena

$$S_e = 12,672 - 2,755 MF \quad S_e = 4,96 \text{ m}^2/\text{kg}$$

Relación A/C necesaria para cumplir resistencia a compresión especificada

$$R_c = 74 - 12,5 T_c - 0,4 (S_e * M_a) - 52 A/C$$

$$\text{Para } R_c = 15 \text{ MPa,} \quad A/C = 0,82$$

Dosis de pasta para cono especificado

$$Co = -16,4 - 0,87 * Se * Ma + 14,4 * A/C + 33,5 * Cpt$$

Para Co = 5 cm, Cp = 0,504 litros (para 1 l de arena compactada)

Densidad mortero resultante

$$Dm = 2.583 - 34 * Tc - 25 * Ma * Se - 188 * A/C - 0,116 * Cpt$$

$$Dm \text{ esperada} = 2.109 \text{ kg/m}^3$$

Comprobación que la dosis de pasta obtenida es mayor a la necesaria para obtener la máxima compactación

Volumen de pasta que rodea los granos de arena = Ra * Se * Ma

$$V_{p1} = 0,00066 * 49.600 * 1,79 = 58,59 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = \frac{V_{p1} * 6}{3,14} = \frac{58,59 * 6}{3,14} = 112 \text{ cm}^3$$

$$Vp = Vh + \Delta Vh \text{ huecos} + V_{p1}$$

$$Vp = 337 + 112 * 0,337 + 58,59 = 433,33 \text{ cm}^3$$

La dosis de pasta adicional, necesaria para obtener el cono deseado, está dada por:

$$V_{p2} = V_{pt} - Vp$$

$$V_{p2} = 504 - 433 = 71 \text{ cm}^3 \text{ para relación A/C utilizada}$$

Cálculo de los componentes para 1 litro de mortero sin aire atrapado

Volumen aparente arena compactada:	1.000 cm ³
Compacidad:	$1 - H(\%) / 100 = 1 - 0,337 = 0,663$
Volumen absoluto arena:	$1.000 * 0,663 = 663 \text{ cm}^3$
Volumen pasta cemento:	504 cm ³
Volumen mortero resultante:	$\frac{663 + 504 = 1.167 \text{ cm}^3}{(\text{sin aire atrapado})}$
Incremento de volumen:	$1167 - 1000 = 167 \text{ cm}^3$

Incremento volumen absoluto estimado: $\Delta V + V_{p2}$

$$112 + 71 = 183 \text{ cm}^3 \text{ (sin aire atrapado)}$$

Consecuentemente, para 1 litro de mortero:

Material	Volumen Aparente	Volumen Absoluto
Arena (cm ³)	857	568
Pasta cemento (cm ³)	432	432
Volumen mortero sin aire atrapado		1.000

Cálculo de la dosis de cemento y agua para 1 l de mortero, sin aire atrapado

$$\begin{aligned} A/C &= 0,85 \\ C/3 + A &= 432 \text{ cm}^3 \\ 0,333 C + 0,85 C &= 432 \\ 1,183 C &= 432 \\ C &= 365 \text{ g} \\ A &= 310 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Dosificación en peso para 1 m³ de mortero

Componente	Peso (kg)	Volumen Absoluto l
Arena	1.534	568
Cemento	365	122
Agua	310	310
TOTAL	2.209	1.000

Densidad sin aire atrapado, Dr = 2.209 kg/cm³
Dm/Dr = 0,95, volumen de aire atrapado, 50 litros, aproximadamente 5%, adecuadamente compactado.

Dosificación corregida considerando aire atrapado

Componente	Peso (kg)	Volumen Absoluto l
Arena	1.457	539
Cemento	347	116
Agua	295	295
Aire atrapado	0	50
TOTAL	2.099	1.000

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El sistema propuesto constituye, a nuestro juicio, una alternativa de dosificación para morteros, validada por una base experimental relativamente importante, que cubre un amplio espectro de relaciones A/C, una banda granulométrica que comprende la recomendada en la norma chilena y los tipos de cemento mas frecuentemente utilizados.

Los modelos estadísticos propuestos son válidos dentro del rango analizado en la presente investigación, el que se encuentra definido por:

- La utilización de una dosis de pasta superior a la mínima requerida para obtener la máxima compacidad.
- Una razón A/C, comprendida entre 0,4 y 1,0.
- El módulo de finura de la arena, comprendido entre 2,2 y 3,5.
- Los tipos y clase de cemento ensayados.

Comparativamente con el método de dosificación definido en la norma chilena, el sistema propuesto resulta menos conservador, permitiendo el uso de mayores relaciones A/C y consecuentemente dosis de cemento menores.

Los valores del espesor de la capa de pasta (Ra), que necesariamente rodea los granos de arena, es aparentemente constante por unidad de superficie y por lo tanto independiente del tamaño de dichos granos.

Por otra parte, si bien el cálculo del aumento de volumen teórico supone partículas perfectamente esféricas o cúbicas, lo que evidentemente representa una simplificación de la realidad, el aumento de volumen calculado, aceptando esta consideración, no difiere mayormente del incremento de volumen absoluto del mortero resultante sin aire atrapado, cuando la dosis de pasta utilizada es igual o superior al mínimo necesario para lograr la máxima compacidad teórica del mortero fresco, lo que en cierto modo valida el espesor de Ra determinado.

Los resultados obtenidos demuestran claramente que al mezclar un volumen de arena conocido, con una dosis cualquiera de pasta de cemento, necesariamente ocurre un aumento de volumen del mortero resultante y consecuentemente, el volumen de pasta requerido para obtener morteros de máxima compacidad en estado fresco, es siempre superior al volumen de huecos de la arena utilizada.

Independientemente de la base experimental que sustenta las relaciones propuestas, el sistema ha sido validado por su aplicación en 20 dosificaciones de prueba, con distintos tipos de arenas, en los laboratorios de DECON.

En las dosificaciones de control realizadas, las diferencias máximas y mínimas, obtenidas por diferencia entre los valores estimados por los modelos y los valores experimentales encontrados, fueron las siguientes:

Variable dependiente	Diferencia mínima kg/m ³	Diferencia máxima kg/m ³	Diferencia % mínimo	Diferencia % máximo
Densidad	+35	-87	+1,6	-4,0
Flow-test	-1,0	+2,3	-4,0	-11,15
Cono	-0,1	+0,3	-7,5	-21,4
R. Compresión	-2,0	-6,0	-13,3	-17,6

Los resultados obtenidos en las dosificaciones de prueba demuestran que las relaciones propuestas para dosificar, entregan valores bastante confiables respecto de la docilidad y densidad del mortero resultante y que tienden a subestimar los valores de resistencia a compresión. Esto último, si bien debe ser considerado al momento de dosificar, permite absorber, en la mayoría de los casos, las desviaciones propias del sistema desde el punto de vista de la seguridad.

El modelo que representa el comportamiento de la resistencia a flexotracción, encontrado por regresión, no presenta una correlación aceptable con las variables independientes consideradas, lo que no hace recomendable su uso. Este fenómeno, ya observado en otras investigaciones, aparentemente demuestra la alta sensibilidad de este tipo de ensayo a pequeñas variaciones de las variables independientes y de control, las que resultan difícilmente manejables incluso con la rigurosidad de los procedimientos utilizados en laboratorio.

A este mismo respecto, se obtuvo una mejor correlación al relacionar directamente los resultados experimentales de compresión y flexotracción, sobretodo en los morteros con relación A/C inferior a 0,58, ya que a partir de este valor, el modelo de predicción encontrado pierde progresivamente precisión, tendiendo a sobrestimar los valores de resistencia a flexotracción.

Los modelos que representan el comportamiento de los ensayos de docilidad, cono y Flow-test, presentan una correlación semejante, superior al 70%, valor que puede considerarse aceptable para este tipo de investigación. No obstante lo anterior, llama la atención la baja correlación encontrada entre ambos ensayos, lo que parece indicar

que no miden exactamente la misma propiedad reológica del mortero ya que no tienen la misma sensibilidad a las variaciones de las variables independientes consideradas.

El modelo propuesto, que permite predecir la densidad del mortero fresco, presenta una buena correlación con los variables explicativas utilizadas, lo que para arenas de densidad normal, permite una adecuada aproximación a los valores reales del mortero resultante.

Finalmente, cabe destacar que, para el tipo de compactación utilizado en la investigación (mesa vibratoria), el porcentaje de aire atrapado, calculado como cociente entre la densidad experimental de los morteros frescos y la densidad obtenida sumando la masa de cada componente por unidad de volumen, sin aire atrapado, entrega valores inferiores a los indicados en la normativa nacional, la que aparentemente estaría sobrestimando esta variable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andaur M., Astorga P., Machuca F., Dosificación de Morteros en Función de la Máxima Compacidad Posible para una Docilidad y Características Mecánicas Predeterminadas; 2003. Memoria Escuela de Construcción Civil, Universidad Católica de Chile.
2. Cisternas L., Poblete E., Navarrete C. Dosificación de Hormigones en Función de la Máxima Compacidad Posible, para una Docilidad y Características Mecánicas Predeterminadas; 1999. Memoria Escuela de Construcción Civil, Universidad Católica de Chile.
3. Gianì Del Ch. Ricardo, Solas A. Andrés; El Hormigón y su Tecnología; 2002; Texto guía, Escuela de Construcción Civil, Universidad Católica de Chile.
- 4.- Solas, Andrés; Análisis de la Variación de la Docilidad por Efecto del Incremento de Cemento y Agua Manteniendo Constante la Razón Agua-Cemento; 1992; Documento Técnico N°13, ECCUC; Santiago.

