PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MORTEROS EN BASE A LA EVALUACIÓN DE LA ARENA

W. VARGAS, H. A. PETIT, O. A. CABRERA

Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y CIFICEN (UNCPBA-
CICPBA-CONICET), Avda. del Valle 5737, 7400, Olavarría, Argentina.

RESUMEN

Existen normas para especificar la calidad de las arenas, pero no son suficientes para predecir su comportamiento en morteros u hormigones. Sin embargo, la norma NZS 3111, define una zona óptima con el porcentaje de vacíos y el tiempo de flujo de la arena en base al comportamiento del hormigón en estado fresco. Las arenas con las que se trabajó en Nueva Zelanda difieren de las locales en cuanto a su finura y las características geométricas de los granos. Por tal motivo, se planteó modificar el equipo de medición y establecer una nueva zona óptima que incluya arenas naturales y trituradas, en base a la fluidez, las resistencias a flexión y a compresión, y la velocidad de succión capilar de morteros.

Palabras clave: arenas; forma y textura; morteros; predicción de las propiedades de los morteros.

ABSTRACT

There are standard to specify the quality of the sands, but they are not specific to predict their behavior in mortars or concrete. However, the NZS 3111 standard defines an optimal zone with the percentage of voids and the flow time of the sand based on the behavior of the concrete in the fresh state. The sands with which they are found in New Zealand differ from the localities in terms of their fineness and geometric characteristics of the grains. For this reason, it was proposed to modify the measuring equipment and establish a new optimal area that specified natural and crushed sands, based on fluidity, resistance to flexural and compression, and the speed of capillary suction of mortars.

Keywords: sand; shape and texture; Mortars predicting the properties of mortars.

1. INTRODUCCIÓN

La arena del hormigón tiene una significativa influencia en sus propiedades mecánicas y de durabilidad por ocupar $\approx 35\text{-}40\%$ de su volumen, y también por influir en el contenido de agua de mezclado. La influencia de la arena se basa en su finura, forma y textura superficial (geometría de los granos), contenido de polvo, resistencia mecánica y composición mineralógica (Mehta and Monteiro, 2006; Neville, 1988). A nivel mundial, debido al agotamiento de yacimientos de arenas naturales (AN) o por las restricciones de origen ambiental o por el costo y emisiones del transporte, es necesario buscar yacimientos de arenas adecuadas a un costo relativamente aceptable (Pilegis et. al., 2016; Alexander and Midness, 2005; Torrent, 2004; Kankkunen and Ojanen, 1992). En el marco de la industria de la construcción resulta cada vez más necesario que las obras civiles sean sustentables, es decir que se utilicen los recursos naturales en forma racional y además, asegurar la vida útil de las estructuras para la cual fueron diseñadas a fin de no volver a consumir mayores recursos minerales. Además, esta acción sustentable presenta beneficios del orden económico.

A su vez, se consideran agregados marginales a aquellos que no cumplen las especificaciones establecidas por los reglamentos respecto a sus propiedades físicas y/o químicas. Generalmente, uno de los requisitos para ser considerado marginal es que la granulometría se encuentre fuera de los límites establecidos por las normas y/o contenido de polvo. Las arenas trituradas (AT) o de machaqueo son consideradas agregados marginales ya que la forma, la textura superficial y el contenido de polvo resultan ser los factores limitantes de su utilización por la incidencia de estas características sobre el consumo de agua de mezclado, y en consecuencia, en las propiedades mecánico-durables del hormigón (Cabrera, 2013).

Respecto a las AT, en la producción de agregados gruesos, durante el proceso de transporte y trituración, se produce una importante cantidad de material $<4.75\text{ mm}$ (10-60% del total), que se considera un subproducto (Kalcheff and Machemehl, 1980). Es necesario que este volumen de AT tenga un uso o deposición final, siendo adecuado evaluar su empleo en el hormigón analizando las modificaciones en su granulometría o contenido de polvo que las restringe normativamente.

Lo antes indicado lleva a estudiar a las AT desde diferentes aspectos a fin de obtener agregados finos que cumplan con requisitos de resistencia, durabilidad, etc., y que puedan ser empleadas en hormigones en porcentajes mayores a los que establecen algunos reglamentos (30%) (CIRSOC 201-05, 2012).

Actualmente en Argentina, la norma IRAM 1627 indica las curvas granulométricas para agregados finos y gruesos, no distinguiendo las características geométricas de las partículas. La BS 882 presenta 4 zonas granulométricas para agregados finos, en las cuales efectúa una consideración sobre el porcentaje que pasa el tamiz N° 100, diferenciando si se trata de AT o AN. En cambio, la norma neozelandesa NZS 3111 establece una relación entre la evaluación de la forma y textura de las partículas de arena por la combinación de dos ensayos (el tiempo de flujo de arena y el contenido de vacíos de la arena en estado suelto) en base al comportamiento en estado fresco del hormigón (Wigum, 2011). La elección de la norma NZS 3111 para este trabajo resultó coherente en el hecho de que toma dos parámetros que se relacionan con el estado fresco y el endurecido de morteros y hormigones. La velocidad del flujo de partículas se asocia a la consistencia de las mezclas, es decir su capacidad de fluir. Y el contenido de vacíos se vincula con la cantidad de pasta necesaria para llenar dichos vacíos, y en general se trata de que en una mezcla haya la mayor cantidad posible de agregados ya que ellos aportan resistencia, dureza, estabilidad volumétrica, economía, etc. por tal motivo se eligieron estos dos ensayos para evaluar las características físicas de las partículas de las arenas.

En nuestro país no existen estudios o normas que asocien la geometría del agregado fino con su comportamiento en morteros y hormigones, por tal motivo el objetivo de este trabajo consistió en buscar la validación o una adaptación del método neozelandés para ser aplicado a las AT o mezclas de diferentes arenas, con tamaños de partículas mayores a los empleados en Nueva Zelanda.

2. MATERIALES, DOSIFICACIÓN Y METODOLOGÍA

2.1 Materiales y dosificación de los morteros

Se emplearon cuatro series de arenas que en la Tabla 1 se indican sus correspondientes valores de densidad (IRAM 1520), % de polvo (IRAM 1540), y forma y textura (BS 812). A continuación, se describen como se obtuvieron las cuatro series de arenas para el estudio.

- *Serie de arenas graníticas*: se partió de una arena granítica triturada 0-6 mm (denominada “original”) que fue tamizada para obtener las arenas G30 (fracción retenida en el tamiz N° 30) y la F16 (fracción pasante en el tamiz N° 16). Luego con estas arenas y mediante el programa Solver se obtuvo una mezcla con una curva intermedia entre las curvas límites de la norma ASTM C-33 (curva ideal, MI). Como MI tenía un contenido de polvo elevado se eliminó parte de este material, obteniendo la arena MP que cumple con los requisitos granulométricos de la norma ASTM C-33.

- *Series de G30 con AN y de F16 con AN*: en estas dos series las proporciones de cada arena, en %, fue de 0/100, 25/75, 50/50, 75/25 y 100/0.

- *Serie de AT dolomítica y MP*: en este caso se mezclaron dos AT de diferentes mineralogías en las mismas proporciones que las dos series anteriores

Tabla 1. Características de las arenas empleadas.

Origen mineralógico	Denominación	% de polvo	Módulo de finura	Densidad	Forma BS 812	Textura superficial BS 812
Granítica	Original (OB)	8.4	2.99	2.66	Angular	Cristalina
	Tamizada (G30)	0	3.93			
	Tamizada (F16)	17.0	1.66			
	Mezcla ideal (MI)	9.4	2.58			
	Procesada (MP)	5.9	2.61			
Silícea	Natural (AN)	0.9	1.59	2.64	Redondeada	Lisa
Dolomítica	Procesada (DP)	19.8	3.45	2.70	Alargada	Rugosa

Como aglomerante se empleó un cemento portland compuesto CPC-40 (IRAM 50000) y se utilizó agua de la red domiciliaria. Con cada serie de arena se moldeó un mortero estándar, con una relación en peso “cemento:arena” de 1:3 y una relación $a/c=0.60$. Las probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ fueron curadas sumergidas en agua saturada con cal a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, hasta la edad de ensayo.

2.2 Metodología

El aparato para evaluar las propiedades de las arenas consta de una tolva con un orificio de 12.7 mm para medir el tiempo de flujo (NZS 3111). El punto de salida del embudo se encuentra a 70 mm por encima de un recipiente cilíndrico de 100 mm de altura y 76 mm de diámetro, que se emplea para determinar el porcentaje de vacíos (“Figura 1”).

En los morteros se evaluó, en el estado fresco, la fluidez con 15 golpes a razón de 1 golpe por segundo (adaptado de IRAM 1679). En el estado endurecido se determinaron las resistencias a flexión y a compresión a 7 y 28 días (IRAM 1622), y la velocidad de succión capilar utilizando cubos de 4 cm de lado, siguiendo un procedimiento similar al descrito por la norma IRAM 1871 para hormigones de cemento portland.

Figura 1. Cono de la norma NZS 3111 para evaluar las características físicas de la arena.

3. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

3.1 Modificación del cono de la NZS 3111

Debido a que el tamaño de partículas de las AT (0-6 mm) producía trabazones entre ellas a la salida del embudo, se fabricó otro de idénticas medidas, con un orificio de 15 mm que se corresponde con 3 veces el tamaño máximo de los granos (4,75 mm).

Finalizada la caracterización de todas las arenas de las 4 series por medio de los dos conos, donde se incluyen las AT, las mezclas de AT con AN y las mezclas de una AT con otra AT, se puede observar que el cambio de diámetro del orificio de salida presenta una relación lineal con los valores obtenidos con el cono de la NZS 3111 (“Figuras 2, a y b”). El porcentaje de vacíos no se ve afectado por el cambio de diámetro ya que esta variable no depende fundamentalmente del diámetro del cono sino del tamaño del recipiente con que se mide, la altura de caída del chorro de arena, de la granulometría, del contenido de polvo, etc. En cambio, el tiempo de flujo se reduce a la mitad cuando se modifica el orificio de 12.7 mm a 15 mm. Este cambio en el diseño del cono permite estudiar no solo a las arenas finas como lo hace la NZS 3111, sino también las arenas gruesas, tipo “0-6 mm”, y tal vez será necesario modificar la zona óptima de la norma neozelandesa, de acuerdo con los resultados de los estudios con morteros.

Figura 2.a. Relación entre los tiempos de flujo obtenidos con los conos de 12.7 y 15 mm, para todas las arenas estudiadas.

Figura 2.b. Relación entre los porcentajes de vacíos obtenidos con los conos de 12.7 y 15 mm, para todas las arenas estudiadas.

Finalmente, en la “Figura 3” se incluyen en el plano de la norma neozelandesa todas las arenas y mezclas de arenas estudiadas, que abarcan una importante zona en el plano “% de vacíos-tiempo de flujo”, empleando el cono con un orificio de 15 mm.

Figura 3. Representación en el plano X-Y de las arenas estudiadas.

3.2 Morteros realizados con la serie de arenas trituradas graníticas

3.2.1 Estado fresco de los morteros

La determinación de la fluidez del mortero caracteriza es importante por su relación con la capacidad de deformarse y la facilidad de ser compactado para eliminar el aire atrapado en el mezclado, sin segregación ni exudación. La fluidez fue de 62.7, 43.4, 37.1, 24.2 y 3.8 % para los morteros OB, MP, MI, G30 y F16, respectivamente.

Ubicando los valores de % de vacíos y tiempo de flujo (con el cono de 15 mm) en el gráfico de la norma NZS 3111 queda definido el punto correspondiente a cada arena, y luego a esos puntos se les asignó el valor de la fluidez de ese mortero. Se destaca que solo el mortero OB se encuentra en la zona óptima especificada (“Figura 4”) y los restantes cerca del borde inferior. La asociación de la fluidez con dos características de la arena, que la definen físicamente con mayor precisión, tiene un sentido de por qué la norma NZS 3111 establece una zona óptima en función del estado fresco.

Figura 4. Relación de la fluidez del mortero con el % de vacíos y el tiempo de flujo de la arena.

Figura 5. Relación de la resistencia a flexión con el % de vacíos y el tiempo de flujo de la arena, a 28 d.

3.2.2 Estado endurecido de los morteros

El ensayo de resistencia a flexión evalúa, entre otros factores, la adherencia entre la pasta y las partículas del agregado. En la “Figura 5” se incluyeron los valores de resistencia a flexión a 28 días en el gráfico

de la norma NZS 3111, y se observa que los mayores valores se encuentran próximos al límite inferior de la zona normalizada.

Por otra parte, al incluir los valores de la resistencia a compresión en el gráfico de la norma NZS 3111, también los mayores valores se encuentran cercanos al límite inferior de la zona establecida (“Figura 6”). El valor medio de la resistencia a 28 días fue de 34.5 MPa y el coeficiente de variación de esta serie fue 15.83%. Los morteros con MP tuvieron el mayor valor de la serie, 40,2 MPa, es decir que el procesamiento de la AT granítica mejoro su performance en el mortero.

Figura 6. Relación de la resistencia a compresión con el % de vacíos y el tiempo de flujo de la arena, a 28 d.

Figura 7. Relación de la VSC de los morteros con el porcentaje de vacíos y el tiempo de flujo de la arena.

La velocidad de succión capilar se asocia a la estructura de poros del material, especialmente al grado de interconexión que existen entre ellos. De esta manera una mayor VSC indica una mayor facilidad del ingreso de sustancias deletéreas tanto para el material o el acero que contenga, es decir que se la puede asociar con la durabilidad del material. El proceso de capilaridad se da en la pasta endurecida de cemento y en la interfaz “pasta-agregado”. La VSC a los 28 días para los morteros de arena granítica resultó ser de $26.8 \pm 1.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.50}$ (Figura 7). El coeficiente de variación de los resultados fue de 3.82%. Comparando este coeficiente, que mide el grado de heterogeneidad de los datos, con el correspondiente al de la resistencia a compresión, se puede afirmar que los procesos que se le efectuaron a la arena original tuvieron mayor impacto en la resistencia que en la VSC.

3.3 Consideraciones parciales sobre AT graníticas

A modo de resumen a continuación se expresan los principales resultados para el grupo de las AT graníticas estudiadas:

- Debido a que las arenas en estudio poseían granos de mayor tamaño respecto a las estudiadas en Nueva Zelanda, se modificó el diámetro del orificio de salida del cono, pasando de 12.7 a 15 mm. En los ensayos se observó que el tiempo de flujo se reduce a la mitad, manteniendo las posiciones relativas entre las arenas. En cambio, el porcentaje de vacíos no sufrió cambios significativos.
- El uso del cono modificado podrá hacer necesario redefinir la zona óptima de la norma NZS 3111.
- Los valores de la fluidez de los morteros fueron del 63% para la arena original y del 43% para el que contenía MP. El menor valor de fluidez, 4%, se obtuvo para el mortero con la AT más fina con un 17% de polvo, F16.
- Los mayores valores de las resistencias a flexión y a compresión se encuentran próximos al límite inferior de la zona normalizada por la NZS 3111. Además, el mortero con la mayor resistencia fue el elaborado con arena procesada (MP).
- Del análisis realizado se puede afirmar que los procesos que se le efectuaron a la arena original tuvieron mayor impacto en la resistencia mecánica que en la VSC.

3.3.1 Consideraciones sobre el comportamiento de los morteros de las series de mezclas de arenas

Un resumen de los resultados experimentales de las últimas 3 series de morteros se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados del estado fresco y endurecido de los morteros.

Serie de arenas	Fluidez (%)	Resistencias (MPa) a:		VSC ($\text{g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.50}$)
		Flexión	Compresión	
100 AN	61.2	6.5	20.4	32.9
75 AN-25MP	87.4	6.9	28.4	28.4
50 AN-50MP	101.0	7.6	32.2	32.0
25 AN-75 MP	105.0	8.4	30.8	30.6
100 MP	43.4	9.3	40.2	26.1
75 AN-25 G30	117.0	6.8	28.8	36.3
50 AN-50 G30	136.3	7.8	34.2	27.6
25 AN-75 G30	102.3	7.8	32.7	27.8
100 G30	24.2	7.2	26.6	28.0
100 F16	4.0	8.3	31.3	27.7
25 DP-75 F16	41.3	8.5	34.1	25.1
50 DP-50 F16	54.8	9.0	35.9	26.5
75 DP-25 F16	71.4	9.0	35.2	26.4
100 DP	69.6	9.3	37.2	25.4

A continuación, se resumen las principales consideraciones sobre las propiedades de éstas series de morteros:

- Los mayores valores de fluidez se obtuvieron en morteros con un 25-50% de AN y con 25-75% de AN, en las mezclas con MP y G30, respectivamente. En cambio, en los morteros con DP, la mayor fluidez se logró con un 25% de F16.
- En las tres series de mezclas de diferentes arenas en el plano de la norma neozelandesa los mayores valores de resistencia se encuentran cerca de la zona inferior del área especificada. Tal vez, por este motivo sea necesario proponer otra zona óptima para un cono de 15 mm de orificio de salida.
- Al igual que en la serie de morteros con AT granítica, la incorporación de AN tiene mayor impacto sobre la resistencia que sobre la VSC.
- Para los morteros con AN y MP, a los 28 días, la máxima resistencia a compresión fue de 40.2 MPa para el mortero con un 100% de MP. En cambio para los que contenían AN y G30 los máximos valores de (34.2 MPa) y la mínima VSC ($27.6 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$) fueron obtenidos para la mezcla de arenas del 50-50%.
- Para los morteros con DP y F16, la resistencia a compresión se incrementa de 31.3 MPa para la mezcla F16 a 37.2 MPa para la mezcla 100% DP. El mayor valor de VSC corresponde al mortero con 100% de F16 ($27.7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$) y el menor corresponde al de 100% de DP ($25.4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$), de manera inversa a lo que sucede con la resistencia a compresión

3.4 Análisis de la zona especificada por la norma neozelandesa

El objetivo de este punto es determinar la validez de la zona especificada por la norma NZS 3111, en base a los resultados experimentales de las 4 series de morteros. Se estableció un límite (máximo o mínimo) para cada propiedad, con un criterio basado en los rangos óptimos entre los resultados obtenidos.

De esta forma se buscó obtener una cantidad de valores representativos, dado que, por ejemplo, si el límite es muy bajo, abarca a la mayoría de los valores, y para un límite muy alto no habría valores para rediseñar la zona de la norma neozelandesa. Con este criterio se adoptaron los siguientes límites, que se consideran apropiados para el desempeño de los morteros:

Fluidez > 65% (el rango de valores fue de 3.8-136.3%).

- Resistencia a flexión a 28 días > 8 MPa (el rango de valores fue de 6.23-9.3 MPa).
- Resistencia a compresión a 28 días > 30 MPa (el rango de valores fue de 19.4-40.2 MPa).
- VSC < 27 g/m².s^{0.5} (el rango de valores fue de 25.1-36.4 g/m².s^{0.5}).

En general, los valores de cada una de estas características de los morteros que se encuentran dentro de los límites antes establecidos, se ubican mayoritariamente por debajo del límite inferior de la zona de la norma. De este modo, se propone modificar la zona (línea de trazos), tal como se indica en las “Figuras 8 a 11”, donde la excepción es el mortero con 100 % de DP.

Figura 8. Valores óptimos de fluidez de los morteros.

Figura 9. Valores óptimos de resistencia a flexión a 28 días.

Figura 10. Valores óptimos de resistencia a compresión a 28 días.

Figura 11. Valores óptimos de VSC a 28 días.

3.5 Análisis de los resultados en tres variables

En las últimas cuatro figuras ha quedado definida una zona óptima que cumple con los requisitos de fluidez, de resistencias a flexión y compresión y de VSC, respecto a las variables que caracterizan la arena. Sin embargo, estos gráficos no muestran la correlación de cada parámetro del mortero, siendo de interés encontrar las superficies de respuesta más adecuadas. Esto significa que se representarán funciones $Z_i=f(x,y)$ donde Z representa a la variable del mortero que se quiera analizar (fluidez, resistencia, VSC), y “x” e “y” el porcentaje de vacíos y el tiempo de flujo de las arenas, respectivamente. Para obtener una buena aproximación, se eligió un método de ajuste para obtener un polinomio de tercer grado de la forma:

$$Z_i(x,y) = a x^3 + b y^3 + c x^2 y + d x y^2 + e x y + f x + g y + h \quad (1)$$

Donde el objetivo fue hallar los parámetros a , b , c , d , e , f , g y h que definan la función que modela los datos. Para resolver este problema se aplicó el método numérico de ajuste por mínimos cuadrados. Las (2), (3), (4) y (5) muestran las ecuaciones para la fluidez, las resistencias a flexión y a compresión y la VSC, respectivamente.

$$Z_1(x,y) = -0.038 x^3 - 0.001 y^3 + 0.243 x^2 y + 0.002 x y^2 - 21.52 x y + 202 x + 477.12 y - 5617.12 \quad (2)$$

$$Z_2(x,y) = -0.001 x^3 + 0.002 y^3 + 0.003 x^2 y - 0.004 x y^2 - 0.128 x y + 3.71 x + 2.73 y - 99.27 \quad (3)$$

$$Z_3(x,y) = -0.003 x^3 + 0.011 y^3 + 0.004 x^2 y - 0.020 x y^2 + 0.649 x y + 2.15 x - 15.64 y - 5.36 \quad (4)$$

$$Z_4(x,y) = 0.003 x^3 - 0.003 y^3 - 0.013 x^2 y + 0.004 x y^2 + 0.916 x y - 12.62 x - 21.05 y + 408.76 \quad (5)$$

Finalmente, por medio del el programa GnuPlot se obtuvieron las superficies de respuesta que permiten establecer curvas de isorespuesta para rangos de los diferentes parámetros de los morteros y el coeficiente de regresión de todos los puntos experimentales, que resultaron relativamente elevados dada la variedad de arenas estudiadas (0.84-0.86). A modo de ejemplo, en la “Figura 12” se muestra la superficie de la resistencia a compresión de los morteros en función del porcentaje de vacíos y el tiempo de flujo de las arenas. En cambio, en la “Figura 13”, se muestran las curvas de isorespuesta entre 30 y 40 MPa.

Figura 12. Superficie de respuesta correspondiente a la resistencia a compresión a 28 días.

Figura 13. Curvas de nivel o de isorespuesta de la resistencia a compresión entre 30 y 40 MPa.

Con los polinomios obtenidos se podrán estimar, con cierta certeza para una arena desconocida, las propiedades de los morteros estándar en los que se la empleará. Las zonas obtenidas en el análisis tridimensional tienen un alto grado de coincidencia con las definidas en el análisis bidimensional (“Figuras 13 a 16”). Es decir que la nueva zona propuesta queda validada por el análisis tridimensional.

Figura 13. Zona de fluidez de morteros validada por las curvas de isorespuesta.

Figura 14. Zona de resistencia a flexión a 28 días validada por las curvas de isorespuesta.

Figura 15. Zona de resistencia a compresión a 28 días validada por las curvas de isorespuesta.

Figura 16. Zona de VSC a 28 días validada por las curvas de isorespuesta.

4. CONCLUSIONES

De los estudios y análisis realizados con diferentes tipos de arenas se pueden establecer, además de las consideraciones parciales efectuadas en el texto, las siguientes consideraciones finales:

- La caracterización simultánea de la arena por medio del porcentaje de vacíos y el tiempo de flujo resultó ser sensible a los cambios de tipos de arenas, a las mezclas de arenas diferentes y a los procesamiento que se le pueden efectuar.
- Para evaluar las características geométricas de las arenas gruesas y/o de trituración fue necesario adaptar el equipo de la NZS 3111, incrementando el diámetro de salida.
- Al efectuarle diferentes procesos a la AT granítica o mezclando arenas en distintas proporciones, se verificó un mayor impacto de estos cambios en la resistencia mecánica de los morteros que en la VSC, dado que ésta última depende principalmente de la calidad y la cantidad de pasta de cemento, que se mantuvieron constante en todos los morteros.
- Se logró obtener una nueva zona óptima en base a niveles mínimos de fluidez, máximos de resistencias a flexión y compresión a 28 días, y mínimos de VSC de morteros, empleando el cono modificado.
- La caracterización de arenas desconocidas por medio del cono modificado permitirá predecir con cierta certeza el comportamiento de un mortero “estándar”, con una proporción en peso de “cemento:arena” igual a 1:3, y una relación $a/c=0.60$, utilizando la nueva zona óptima propuesta en este trabajo.
- Esta predicción “supera” de algún modo a la propuesta de la NZS 3111 ya que en ese caso se tiene en cuenta el estado fresco, y aquí se tiene en cuenta, además el estado endurecido de los morteros.

5. REFERENCIAS

- Alexander, M.G. & Mindess, S., (2005). “*Aggregates in concrete*”, Ed. Taylor & Francis, London, 435 p.
- British Standard. (1975). *BS 812: Part 1: Methods for Sampling and Testing of Mineral Aggregates, Sands and Filler: Sampling, Shape, Size and Classification*.
- Cabrera, O.A. (2013). “*Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración*”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, 365 páginas.
- Centro de Investigaciones de Reglamentos para la Seguridad de Obras Civiles. CIRSOC 201. (2005). “*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*”. Ed. INTI-CIRSOC, Argentina.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2002). *IRAM 1520: Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua, 2002*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1986). *IRAM 1540: Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μ m, por lavado*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1962). *IRAM 1622: Cemento Portland. Método de determinación de las resistencias a la compresión y a la flexión*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1997). *IRAM 1627: Agregados: granulometría de los agregados para hormigones*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1970). *IRAM 1679: Cemento de albañilería. Métodos de ensayo*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). *IRAM 1871: Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2015). *IRAM 50000: Cemento. Cemento para Uso General*.

- Kalcheff, I.V. & Machemehl, C. (1980). "Use of crushed stone screenings in highway construction", Transportation Research Record, pp.741, 40-42.
- Kankkunen, H. & Ojanen, P. (1992). "Concrete rheology and compaction", *Nordic Concrete Research*, (11), pp. 100-109.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. (2006). "Concrete. Microestructure, Properties and Materials", 3th Edition, Ed. Mc Graw-Hill Companies Inc., New Jersey, USA.
- Neville, A.M. (1988). "Tecnología del Concreto", Tomos 1 a 3, Ed. Limusa S.A., México.
- New Zealand Standard. (1986). NZS 3111:1986: Methods of test for water and aggregate for concrete.
- Pilegis, M.; Gardner, D. & Lark, R. (2016). "An investigation into the use of manufactured sand as a 100% replacement for fine aggregate in concrete", *Materials*, 9, 440; doi:10.3390/ma9060440.
- Torrent, R. (2004). "Tendencias del hormigón en las próximas décadas", *Boletín Informa* 25: pp. 8-9, Ed. Centro Tecnológico del Hormigón, Santiago, Chile.
- Wigum, B. J. (2011). "Classification and Particle Properties of Fine Aggregates ($< 63\mu\text{m}$) - Applied as concrete aggregate. FA 2 Competitive constructions. SP 2.3 High quality manufactured sand for concrete", Publisher SINTEF Building and Infrastructure, Series: COIN Project Report; 32, Oslo, Norway.