

Avances en la caracterización del hormigón mediante el procesamiento digital de imágenes

M. Positieri¹, A. Oshiro¹, C. Baronetto¹, A. Segura¹, H. Begliardo², J. Fornari²

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba - CINTEMAC. ²Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela. mpositieri@gmail.com, 1: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba - CINTEMAC. mpositieri@gmail.com oshiroangel@gmail.com, carlosbaronetto@gmail.com, adrian-segura@hotmail.com hfbegliardo@gmail.com, javier.fornari@frra.utn.edu.ar, web: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintemac/>

RESUMEN

El hormigón evoluciona rápidamente tornándose un material cada vez más complejo debido a la variedad de materiales componentes, entre otros factores. Si se considera la necesidad de reutilizar o reciclar materiales, la evaluación del hormigón se complica más, por lo que los investigadores están en la búsqueda de metodologías que contribuyan al conocimiento de su comportamiento con mayor facilidad. Se presenta el análisis de hormigones elaborados con distintas relaciones agua-cemento en los que se determinan su resistencia a compresión, módulo de elasticidad, velocidad de ultrasonido, índice esclerométrico. Se capturan las imágenes sobre superficies rectificadas y pulidas y se procesan analizando las características extraídas de su digitalización con algoritmos de inteligencia computacional. Si bien se está en la etapa inicial de la investigación los resultados obtenidos muestran una buena correlación entre algunas propiedades del hormigón y el procesamiento de las imágenes.

Palabras clave: Hormigón, procesamiento digital, imágenes

ABSTRACT

Concrete evolves rapidly becoming an increasingly complex material due to the variety of component materials, among other factors. Considering the need to reuse or recycle materials, the evaluation of concrete becomes more complicated, so that researchers are in search of methodologies that contribute to the knowledge of their behavior more easily. The analysis of concretes prepared with different water-cement ratios in which their compressive strength, modulus of elasticity, ultrasonic velocity, sclerometric index are determined. The images are captured on ground and polished surfaces and are processed by analyzing the features extracted from their digitization with computational intelligence algorithms. Although it is in the initial stage of the investigation the obtained results show a good correlation between some properties of the concrete and the processing of the images.

Keywords: Concrete, digital processing, images

Autor de contacto: M. Positieri.

¹ CINTEMAC. Universidad Tecnológica Nacional, e-mail: mpositieri@gmail.com, web: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintemac/>

1. INTRODUCCIÓN

El modo habitual y más preciso para evaluar la calidad de los hormigones es realizar ensayos destructivos sobre probetas (determinación de la resistencia potencial), o bien sobre testigos extraídos de las obras (determinación de la resistencia efectiva).

En tiempos recientes se están desarrollando procedimientos de evaluación de la resistencia y medición de deformación de hormigones basados en técnicas de no-contacto, fundamentalmente mediante sistemas de visión o toma de imágenes y su posterior procesamiento, favorecidas por la mejora permanente de las prestaciones de las cámaras fotográficas y de las capacidades de las computadoras. Estas técnicas, que en sí mismo implican una mejora con respecto al empleo tradicional de sensores como los calibradores de tensión (strain gages), al no verse afectadas por variaciones debidas a las condiciones climáticas, lo que sí acontece con estos últimos.

No se han encontrado antecedentes de trabajos sistemáticos en nuestro país sobre el empleo de técnicas de no-contacto, basadas en el procesamiento de imágenes, como medio alternativo a los ensayos convencionales (destructivos o no destructivos) para evaluar la calidad de hormigones, tanto en laboratorio como en el mismo emplazamiento de las obras.

Con el objetivo de contribuir en este sentido se propone el desarrollo de un modelo clasificador de hormigones convencionales a partir del empleo de agregados de diferentes procedencias y cementos de distinta composición con la aplicación de ingeniería computacional (redes neuronales), haciendo uso de los datos aportados por software específicos de procesamiento de imágenes.

En este trabajo se presentan los primeros resultados del análisis de hormigones elaborados con distintas relaciones agua-cemento, manteniendo el asentamiento, en los que se determinan su absorción de agua, porosidad abierta, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, velocidad de ultrasonido e índice esclerométrico. Como tema central se presenta el procedimiento para la captura de las imágenes sobre superficies rectificadas y pulidas y se procesan analizando las características extraídas de su digitalización con algoritmos de inteligencia computacional, correlacionando estos resultados con los de los ensayos tradicionales sobre los hormigones elaborados.

2. MATERIALES Y METODOS

Para la elaboración de la familia de hormigones se emplearon agregados naturales procedentes de canteras de la zona cercana a la Ciudad de Córdoba y así también como el cemento utilizado.

2.1. Materiales y Dosificaciones

Cemento: Se utilizó cemento fillerizado, categorizado CPF 40, según norma IRAM 50.000, con una densidad relativa de 3,15.

Agregado Grueso: Se utilizó piedra partida de tamaño máximo de 19 mm con una densidad de 2.68 y una absorción de 0,77%. El agregado tiene una granulometría continua y dentro de curvas límites, según norma IRAM 1627.

Agregado Fino: Se utilizó una arena mezcla como agregado fino para cumplir con curvas límites de norma, con una densidad de 2.68 y una absorción de 0,95%.

Seleccionados y caracterizados los materiales se diseñaron los hormigones con tres relaciones agua/cemento distintas. Las dosificaciones, manteniendo el asentamiento en 4 cm, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Dosificaciones para un metro cúbico de hormigón

Materiales	Unidad	Hormigones		
		T-193	T-204	T-213
Agua	Kg	190	190	190
Cemento	Kg	422	345	292
Agregado Fino (arena fina)	Kg	192	210	222
Agregado Fino (arena gruesa)	Kg	608	667	708
Agregado Grueso	Kg	968	968	968
a/c	--	0,45	0,55	0,65

2.2. METODOS

2.2.1 Caracterización de los hormigones

Siguiendo las técnicas tradicionales de caracterización de los hormigones, se realizaron los siguientes ensayos:

Se evaluó la capacidad de absorción (A%) y la porosidad abierta (Pa%) de las muestras, por el método de saturación de las muestras durante 24 hs y su posterior secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante.

La capacidad de absorción fue evaluada con la ecuación (1)

$$A=(V_{pa}/V_t)*100 \quad (1)$$

Donde:

V_{pa}= volumen de poros abiertos

V_t= volumen total de la muestra

En tanto, la porosidad abierta se evaluó con la ecuación (2)

$$Pa=[(W_{sss}- W_s)/W_s]*100 \quad (2)$$

Donde:

W_{sss}= peso saturado superficie seca

W_s= peso seco (masa constante)

La resistencia a compresión se determinó según Norma IRAM 1546, la velocidad de ultrasonido según Norma IRAM 1683, el índice esclerométrico según Norma IRAM 1694 y el módulo de elasticidad según Norma ASTM C-469. Estas determinaciones se realizaron a los 28 días de edad.

2.2.2. Procesamiento digital de imágenes

Captura de las imágenes

Las imágenes de las muestras fueron tomadas con una cámara réflex digital NIKON D3300, de 24,2 megapíxeles de resolución, en formato crudo (RAW), para luego editarlas, filtrarlas y convertirlas a JPG para su procesamiento. La cámara se fijó sobre un trípode, en posición vertical y a una altura aproximada de 37 cm, asegurando el foco como se presenta en la Figura 1, con acercamiento con zoom.

Se trabajó con buena iluminación natural favoreciendo que se destaquen las rugosidades y el oscurecimiento de los poros por su sombra, lo cual permitió una mejor y más clara identificación de los mismos.

Para el procesamiento digital de las imágenes (DIP) se utilizó el software de código abierto ImageJ (<https://imagej.net/ImageJ>)



Figura 1. Posición de la cámara y distancia al objeto

Criterios adoptados para la separación digital del agregado grueso y de los vacíos del mortero

Agregado grueso

Se adoptó como criterio de separación de las inclusiones (agregados) de la matriz (mortero) el empleado al realizar los ensayos granulométricos, el cual considera “piedra” o “agregado grueso” a todo lo retenido por el tamiz ASTM #4 (IRAM 4,76mm) y al resto como “arena” o “agregado fino”, que formará parte del mortero (Figura 2).

A partir de estos conceptos el programa ha interpretado y tomado como “agregado grueso” a toda superficie proyectada de los agregados de área mayor o igual a 17,80 (≈ 18) mm², equivalente a la de un círculo inscrito en dicho tamiz. Si la partícula era de forma acicular y su superficie superaba el valor indicado, la consideraba como tal; si era menor, “pasaba” el tamiz y no era computada por el software.

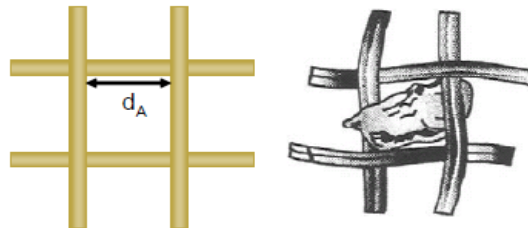


Figura 2. Diámetro de tamiz separador $d_A = 4,76$ mm

No se ha puesto límite a la circularidad (C) de los agregados a fin de permitir que, cualquiera fuese su forma, todas las quedarán incluidas en la selección. La circularidad es evaluada por el software con la ecuación (3).

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3)$$

Donde:

A= área proyectada de la partícula

P= perímetro de la partícula

Esta forma de evaluar la circularidad se la conoce como de “alta sensibilidad”, por cuanto es capaz de contabilizar mínimo cambios en la relación área/perímetro. Los valores de C quedan comprendidos entre 0,00 y 1,00. La Figura 3 ilustra sobre ello.



Figura 3. Circularidad de diferentes partículas (Fuente: www.malvern.com)

El único límite impuesto fue su tamaño el cual, como se expresara anteriormente, no debía ser menor a 17,80 (≈ 18) mm². La Figura 4 ilustra sobre la selección de tamaño y circularidad aplicada en el software al seleccionarse el agregado grueso.

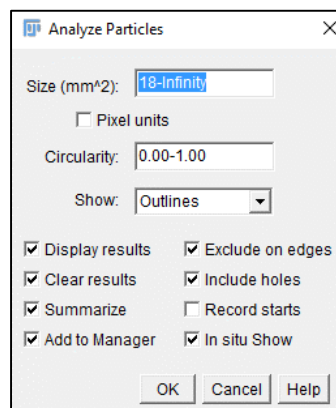


Figura 4. Selección del rango de tamaños y circularidad del agregado grueso

Vacíos

Entendiendo que la porosidad es un factor determinante en las propiedades del hormigón, se considera importante segmentar también este parámetro, al igual que lo realizado con el agregado grueso. La influencia de la porosidad en la resistencia de morteros y hormigones es destacada y tratada por muchos autores tales como (Popovics, 1998; Das y Kondraivendhan, 2012; Ozturk y Barandan, 2008; Sluzarek, 2010; Chen et al., 2013; Zhao et al., 2014; Zingg et al., 2016). En tal sentido, Basyigit et al. (2012) y Zhou et al. (2015), también han tenido en cuenta esta separación de los vacíos de aire al evaluar la resistencia de hormigones mediante el procesamiento de imágenes. Se asume que se considera sólo la porosidad que forma parte del mortero, descartando la propia del agregado grueso.

La porosidad en el hormigón se extiende a un muy amplio rango de medidas, desde la nanoescala a la escala milimétrica. Se identifican cuatro tipos de poros, como lo ilustra la Figura 5. A nivel nanoescala la porosidad se presenta entre las láminas C-S-H; desde la nanoescala a la microescala se pueden observar redes capilares debido al exceso de agua libre en el hormigón, identificándose los como poros de gel (0,5 nm a 10 nm) y

poros capilares (10 nm a 10 μm); entre 50 μm y 1 mm la porosidad es debida, principalmente, al ingreso de aire durante el proceso de mezclado; finalmente, la escala milimétrica comprende a aquellos huecos de aire atrapados durante el proceso de vibrado del hormigón, guardando estrecha relación con su trabajabilidad (Zingg et al., 2016). En este caso, este último rango es debido al proceso de varillado durante el llenado de las probetas.

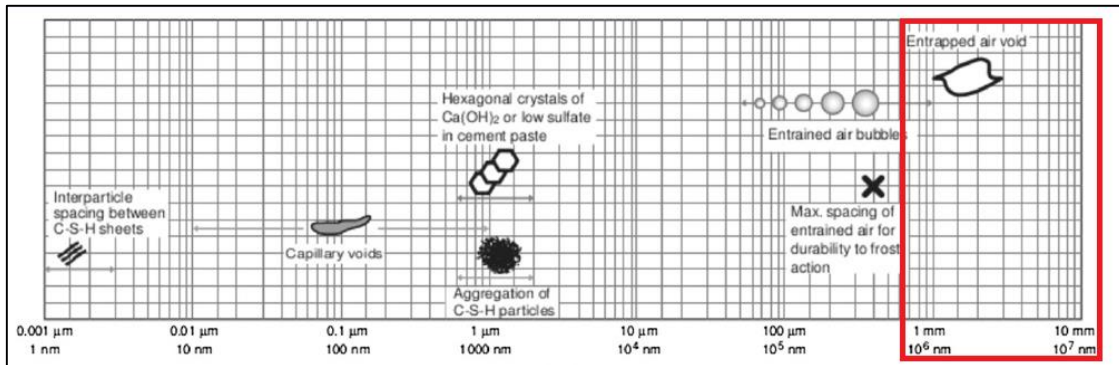


Figura 5. Escala de sólidos y poros en el hormigón (Fuente: adaptada de Zingg et al., 2016)

Por lo expuesto, para el tratamiento digital de imágenes lo ideal sería trabajar con microscopio electrónico de barrido (SEM) a fin de alcanzar esas escalas más pequeñas, pero dado la limitación que imponen las cámaras réflex como la empleada, se trabajó dentro del rango de escala milimétrica (indicado con un recuadro rojo en la Figura 5). Un criterio similar ha empleado Basyigit et al. (2012), cuya línea de trabajo, en general, se ha seguido. Al establecer los umbrales (threshold), se tomó como límite inferior de vacíos a aquellos poros de superficie de área no menor a 0,79 mm^2 (correspondiente al círculo de diámetro 1 mm) y como umbral superior una superficie de área sin límite (Infinity); la circularidad se tomó dentro del rango 0,40-1,00 como se indica en la Figura 6. Los vacíos evaluados no distinguen entre porosidad abierta y cerrada.

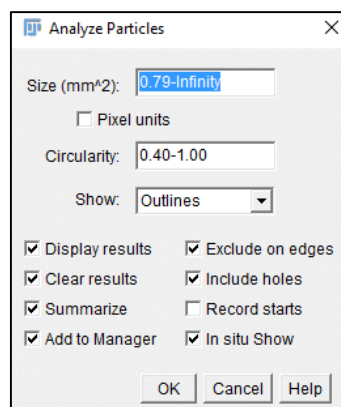


Figura 6. Selección del rango de tamaños y circularidad de vacíos en el hormigón

Segmentación

El procedimiento de segmentación de agregados gruesos y vacíos se ha realizado de modo separado. Los pasos empleados, comunes a ambos procedimientos, han sido los siguientes:

- a) Selección y recorte de la imagen.
- b) Establecimiento de la escala, asumiendo un diámetro nominal de 150 mm para todas las muestras.
- c) Conversión a escala de grises de 8 bits (Figura 7 a y b).

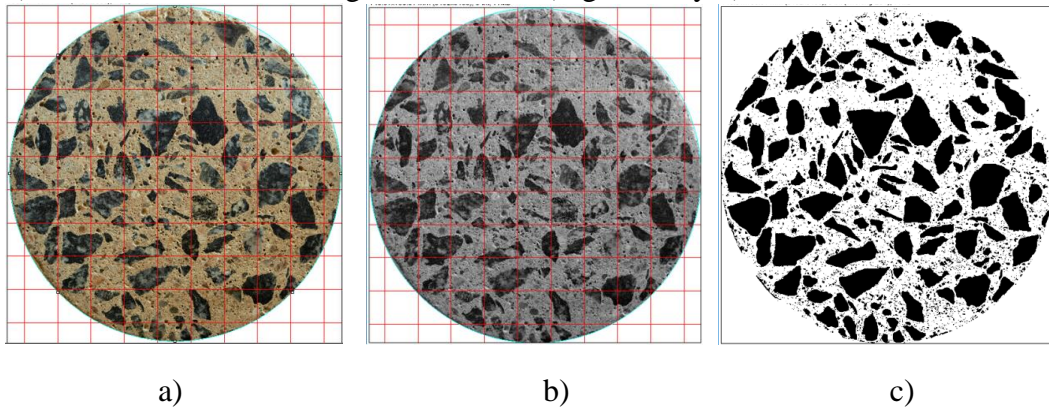


Figura 7: Imagen original recortada (a), llevada a escala de grises de 8 bits (b) y final binarizada (c)

- d) Binarización (make binary) de la imagen y retoques

Puesto que las partículas de agregado grueso presentan diferentes tonalidades, al llevarla a escala de grises algunos tonos se confundieron con los del mortero. Esto se manifestó al “binarizar” las imágenes (conversión a blanco/negro) no quedando bien definidos los contornos de algunas de ellas. Una situación similar se presentó con los poros. Basigyit et al. (2012) parecen no haber tenido dicho inconveniente, probablemente porque la coloración de las partículas ha sido de tonalidad lo suficientemente homogénea y bien diferenciada de la matriz cementicia. Esto les ha permitido trabajar con histogramas dentro de la escala de grises (que va de tonos de valor 1 a 255) y establecer umbrales de selección (threshold) dentro de valores que les facilitaron la segmentación, tanto en el caso del agregado como en el de los poros. En nuestro caso no ha sido así por lo que se debió aplicar un retoque manual en agregados y poros como parte del pre-proceso que se completó con el llenado de huecos (fill holes) tal como se presenta en la Figura 8. Debido a lo laborioso del pre-proceso y retoques necesarios que debió aplicarse a cada imagen, por razones de tiempo sólo he analizado una de las caras de cada probeta.

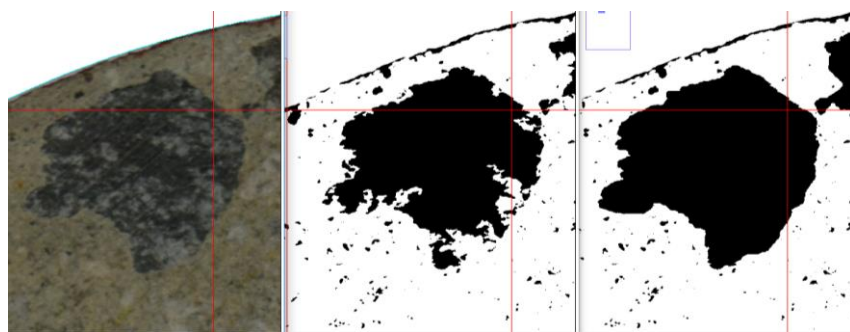


Figura 8. Pre-procesamiento: Imagen original de una partícula de agregado grueso (izq.), binarizada inicial (centro) y binarizada final retocada (der.)

Sin embargo, lo realizado cuenta con imprecisiones –sobre todo en los poros- que en cierta medida pueden impactar en el cómputo final de sus dimensiones, por cuanto, como lo manifiesta Moreira Canut (2011), el valor de los tonos de píxeles suele ser

bastante indefinido en los bordes, como se puede apreciar en la imagen con píxeles magnificados de la Figura 9. A dicha imprecisión, obviamente, tampoco han escapado Basyigit et al. (2012).

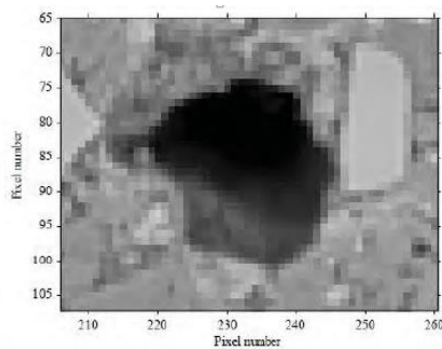


Figura 9. Bordes de poros no definidos (Fuente: Moreira Canut, 2011)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de ensayos de caracterización de hormigones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de hormigones

Resultados	Hormigones		
	T-193	T-204	T-213
Absorción (%)	4,51	5,39	5,75
Porosidad abierta (%)	10,56	12,43	13,19
Resistencia a compresión (MPa)	33.73	23.23	19.4
Módulo de elasticidad (GPa)	30.9	28.4	28.7
Velocidad de ultrasonido (m/sg)	4286	4240	4048
Índice esclerométrico	41	39	35
a/c	0,45	0,55	0,65

Para el procesamiento de imágenes se seleccionaron las opciones de análisis indicadas en las Figuras 4 y 6, según se trate de agregados gruesos o vacíos, respectivamente. Las figuras 10 y 11 ilustran sobre imágenes ya segmentadas de agregados gruesos y poros, comparándolas con la de la muestra original. La grilla visible es un recurso que provee el software, útil para su empleo en el pre-proceso.

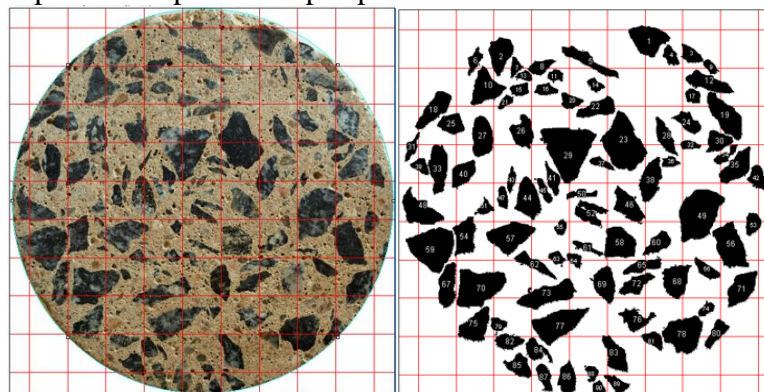


Figura 10. Imagen original (izq.) y segmentada del agregado grueso (der.)

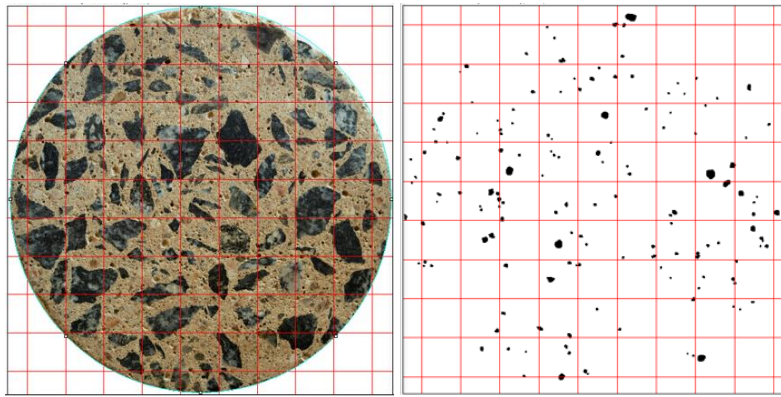


Figura 11. Imagen original (izq.) y segmentada de poros (der.)

Las imágenes de la Figura 12 revelan un aumento en la porosidad de escala milimétrica, poniéndose de manifiesto a medida que aumenta la relación a/c.

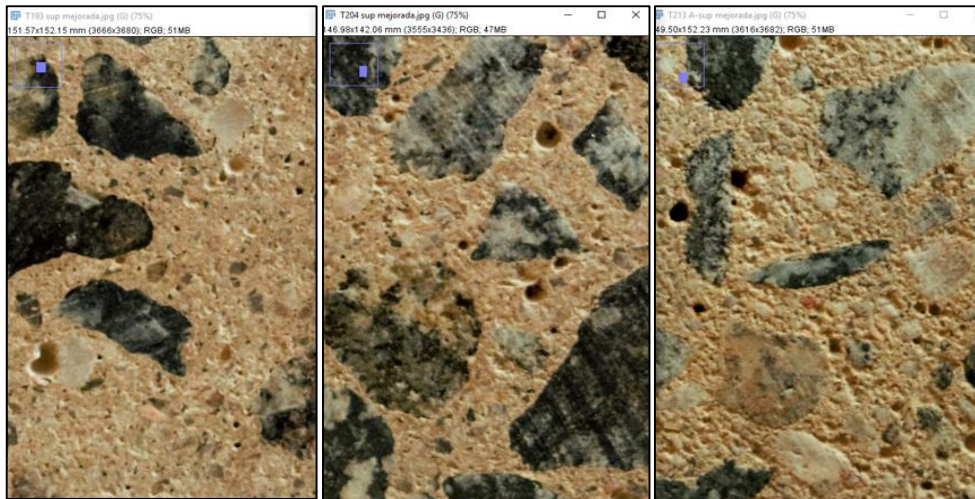


Figura 12. Imágenes de superficies de muestras con 75% aumento para distintas relaciones a/c (0,45; 0,55; 065)

Sólo se analizó una cara de cada muestra; si bien se puede asumir que la operación de varillado al confeccionar las probetas -respetando el procedimiento normalizado- da lugar a una distribución homogénea del agregado grueso, esto puede no darse en la práctica, por lo que se estima que el análisis de la cara restante aportará información complementaria y al promediar los valores, disminuirá el margen de incertidumbre sobre la distribución real de los agregados y vacíos en la matriz. En la Tabla 3 se presentan los resultados promedios de la evaluación del procesamiento digital de imágenes. Los porcentajes de agregado grueso y de poros abiertos aumentan con la relación a/c.

Tabla 3. Porcentajes determinados con procesamiento de imágenes

Resultados	Hormigones		
	T-193	T-204	T-213
Agregado grueso (%)	30.63	37.66	38.44
Poros abiertos (%)	1.05	1.11	1.43
a/c	0,45	0,55	0,65

Analizando el contenido de las Tablas 2 y 3 se manifiesta una correlación directa entre los resultados de ensayos tradicionales del hormigón y los obtenidos a partir de la detección de imágenes, ya que estos últimos aumentan con la relación *a/c* de forma similar a la que lo hacen la resistencia a compresión, módulo de elasticidad, velocidad de ultrasonido e índice esclerométrico.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos son alentadores; hasta el momento deben tenerse como meramente exploratorios en el inicio de la evaluación de la resistencia de hormigones a compresión y otros parámetros a partir del tratamiento digital de imágenes.

El software empleado, *ImageJ*, es una herramienta muy útil y potente para el procesamiento digital de las imágenes y es utilizado en amplios campos de la ciencia (fundamentalmente en nanotecnología).

Un camino abierto a este tipo de estudios es profundizar los mismos mediante la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA), para lo cual se deberá alimentar la información ampliando el número y diversidad de muestras.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado de la Universidad y a las Facultades Regionales por el apoyo económico y la facilitación de infraestructura y equipamiento para la realización de este Proyecto de Investigación

6. BIBLIOGRAFÍA

Basyigit C., Çomak B., Kiliçarslan S., Serkan Üncü I., (2012). *Assessment of concrete compressive strength by image processing technique*. Construction and Building Materials 37,526–532

Chen X., Wu S., Zhou J., (2013). *Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar*. Construction and Building Materials 40, 869–874

Das B.,Kondraivendhan B., (2012). *Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete*. Construction and Building Materials 28, 382–386

Moreira Canut M., (2011). *Pore structure in blended cement pastes*. PhD Thesis. Department of Civil Engineering. Technical University of Denmark.

Ozturk A., Baradan B., (2008). *A comparison study of porosity and compressive strengthmathematical models with image analysis*. Computational Materials Science 43 (2008) 974–979

Popovics S., (1998). Strength and related properties of concrete: a quantitative approach

Śluzarek J., (2010). The correlation of structure porosity and compressive strength of hardening cement materials. Architecture Civil Engineering Environment. The Silesian University of Technology, N°3/2010, pp. 85-92.

Zhao H., Xiao Q., Huang D. and Zhang S., (2014). *Influence of Pore Structure on Compressive Strength of Cement Mortar*. The Scientific World Journal. Volume 2014, Article ID 247058, 12 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/247058>

Zhou S., Shen A., Li X.,and Li G., (2015). *A relationship of mesoscopic pore structure and concrete bending strength*. Materials Research Innovations .Vol 19, Suppl 10

Zingg L., Briffaut M., Baroth J., Malecot Y. (2016).*Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete*. Cement and Concrete Research, Vol 80, pp. 52–59.