

Confección manual de concreto mediante suspensión mecánica para aplicar en hábitats populares

Manual concrete manufacturing by means of mechanical suspension for application in popular habitats

Carlos Mauricio Bedoya

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (Colombia)

Facultad de Arquitectura

Escuela de Construcción

Arquitecto constructor, Universidad Nacional de Colombia. Medellín (Colombia)

Doctor en Proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana. San Francisco de Campeche (México)

<https://scholar.google.es/citations?hl=es&user=vUYHN2wAAAAJ>

<https://orcid.org/0000-0001-9702-5076>

cmbedoya@unal.edu.co; mbedoya2000@yahoo.com

Bedoya, C. M. (2022). Confección manual de concreto mediante suspensión mecánica para aplicar en hábitats populares. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 24(1), 98-105. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4064>



doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4064

Resumen

Este artículo da a conocer una metodología para la confección manual de mezclas de concreto mediante el principio de suspensión mecánica, con el que se obtuvieron mezclas de concreto con un desempeño óptimo en cuanto a resistencia a la compresión, porosidad, densidad y porcentaje de vacíos. Se hicieron ensayos de destrucción de muestras cilíndricas a 7, 14, 28 y 56 días de elaboración; porosidad, densidad Bulk y vacíos según ASTM C-642; microscopía de barrido electrónico (MBE) con análisis de sonda química, y mediciones de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Los resultados permiten concluir que es factible confeccionar manualmente mezclas de concreto sin aumento del consumo de cemento, lo que optimiza el comportamiento del material en cuanto a durabilidad, ya que se obtuvo un material homogéneo con mejor dispersión del material cementante, que cualifica sus condiciones reológicas. A este trabajo se le concedió Patente de Invención, con el número 16136903, y tanto el autor como la Universidad Nacional de Colombia han donado a la sociedad dicho proceso, para que pueda ser llevado a cabo en territorios como Latinoamérica, África y Asia, que comparten procesos de autoconstrucción, con asesoría de centros académicos y de trabajo social. También puede ser empleada en obras que requieran elaborar pequeñas cantidades de concreto para ajustes de mezclas.

Palabras clave: arquitectura tradicional; cemento; construcción sostenible; durabilidad; hormigón; materiales de construcción;

Abstract

This paper presents a methodology for the manual preparation of concrete mixtures using the principle of mechanical suspension, with which concrete mixtures were obtained with optimal performance in terms of compressive strength, porosity, density and void percentage. Destruction tests were performed on cylindrical samples at 7, 14, 28 and 56 days of age; porosity, bulk density and voids according to ASTM C-642; Scanning Electron Microscopy (SEM) with chemical probe analysis; and ultrasonic pulse velocity (UPV) measurements. The results allow concluding that it is feasible to manually make concrete mixes without increasing cement consumption, which optimizes the material's performance in terms of durability, since a homogeneous material was obtained with better dispersion of the cementitious material, which qualifies its rheological conditions. This work was granted an Invention Patent, number 16136903, and both the author and the Universidad Nacional de Colombia have donated this process to society so that it can be carried out in territories such as Latin America, Africa and Asia, which share self-construction processes, with advice from academic and social work centers. It can also be used in works that require the elaboration of small quantities of concrete for mixture adjustments.

Keywords: cement; concrete; construction materials; durability; sustainable construction; traditional architecture

Recibido: mayo 27 / 2021

Evaluado: septiembre 15 / 2021

Aceptado: octubre 26 / 2021

Introducción

En Colombia, y en general en América Latina, la construcción informal crece cada vez más (Turner, 2018, p. 69), por lo que es un hecho que una parte importante de las ciudades se materializa a espaldas de la planeación municipal o gubernamental. Además de representar esto un problema de tipo social y ambiental, dado que no se alcanzan estándares de habitabilidad como equipamientos educativos o recreativos, la calidad de la construcción a veces no es de óptima factura, o para serlo debe asumir sobrecostos, como es el caso de la confección de concretos y morteros, como quiera que este material compuesto es uno de los más empleados para la consolidación del hábitat construido (Sakai, 2009, p. 2).

Al no contar con tecnologías mecánicas para la elaboración de mezclas que emplean cemento Portland ordinario (CPO), la mayoría de las veces los constructores informales confeccionan los morteros —para pega de ladrillos y revoques— y los concretos —para columnas, vigas y losas— mediante el mezclado manual de los materiales (Aguwa, 2010, p. 60). Esencialmente, en las obras pequeñas se utilizan: agregados finos y gruesos, cemento Portland de uso general y agua. El procedimiento empleado desde hace décadas consiste en: 1) mezclar en seco los agregados hasta lograr homogeneidad; 2) agregar el cemento a los agregados y mezclar hasta lograr homogeneidad; 3) elaborar una especie de volcán con esta mezcla de agregados y cemento, para verter en el centro el agua y hacer el mezclado final, hasta obtener bien sea mortero o concreto. Estos pasos y su orden son igualmente aplicados en Europa, Asia y África, bien sea porque se confeccionan pequeños volúmenes, o bien, porque hacerlo obedece a construcciones informales.

Aunque se habla de que hay homogeneidad en la mezcla de los agregados y del cemento en estado seco, esto no es del todo cierto: por el contrario, como se pudo comprobar mediante esta investigación a través de imágenes de MBE, ni la dispersión del cemento ni el recubrimiento de los agregados se logran de manera óptima, lo que incide también en aspectos de resistencia y durabilidad. A lo anterior se suma que suele tomarse

la decisión de adicionar más cemento que lo calculado para suplir la deficiencia del mezclado manual, y ello encarece el costo del metro cúbico de mortero y concreto, precisamente, para las comunidades que menos ingresos mensuales tienen, y que, debido a la tercerización y a la cadena de suministros con intermediarios, pagan el cemento más costoso del mercado; por lo tanto, se expone en este artículo cómo se llegó a replantear una metodología de mezclado manual empleada durante más de diez décadas, inherente a la existencia del cemento Portland moderno proponiendo una nueva sucesión de etapas en cuanto al mezclado de sus componentes y, con ello, una mejor dispersión del cemento, lo que contribuye a la mejora de características intrínsecas del material, tales como una menor porosidad, una menor absorción y una mayor activación del material cementante en la mezcla.

Metodología

A continuación se describen las materias primas y los métodos empleados para las mezclas de concreto, como también, los ensayos y la discusión de los resultados obtenidos. Al concreto elaborado con procedimiento manual de mezclado convencional se lo denominó MCV, y al elabo-



Figura 1. Materiales para las mezclas. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 2. Mezcla de agregados grueso y fino en estado seco. Fuente: elaboración propia (2019). CC BY

rado con procedimiento de mezclado mediante suspensión mecánica se lo denominó MSM.

Selección de materias primas

Se emplearon agregados naturales provenientes de cantera. En la tabla 1 se muestran las características del agregado grueso y el fino.

El cemento empleado fue CPO, o de uso general, cuyas características se muestran en la tabla 2.

Confección de las mezclas mediante MCV y MSM

Las mezclas fueron confeccionadas en el Laboratorio de Construcción de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Se diseñaron dos mezclas de concreto: una denominada *mezclado manual convencional* (MCV) y otra denominada *mezclado manual con suspensión mecánica* (MSM). Se buscó un asentamiento del orden de los 5 cm a los 7,5 cm, empleando una relación A/C de 0,52 en las dos mezclas. Los asentamientos se muestran en la tabla 3.

Confección del mezclado manual convencional

La mezcla MCV es el procedimiento empleado en todo el mundo para la confección de morteros y concretos a pequeña escala. Presenta las siguientes etapas:

- Se preparan y se mezclan los agregados en estado seco, hasta obtener una mezcla aparentemente homogénea, tal como se muestra en las figuras 1 y 2.

Tabla 1. Características de los agregados empleados.

Fuente: elaboración propia (2020).

Variable	Agregado grueso	Agregado fino
Tamaño máximo (mm)	19,05	—
Densidad aparente seca (g/cm ³)	2,87	2,74
Módulo de finura	7,20	3,30
Porcentaje de absorción (%)	1,28	3,00

Peso específico (g/cm ³)	Blaine mín. (cm ² /g)	F'c 3 días (MPa)	F'c 7 días (MPa)	F'c 28 días (MPa)
3,10	2 800	8,00	15,00	24,00

Tabla 2. Propiedades del cemento empleado.

Fuente: elaboración propia (2020).

Tipo de mezcla	Asentamiento (cm)
MCV	6,90
MSM	7,20

Tabla 3. Asentamiento de las mezclas confeccionadas.

Fuente: elaboración propia (2020).

A

Este artículo está disponible en la página web de *Revista de Arquitectura (Bogotá)* doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4064

Manual concrete manufacturing by means of mechanical suspension for application in popular habitats



- Luego se hace una especie de volcán, para verter el cemento en el centro de los agregados, y se revuelve hasta obtener una mezcla seca aparentemente homogénea y de predominante color gris, tal cual se ve en la figura 3.
- Finalmente, se vierte el agua sobre la combinación agregados-cemento y se revuelve hasta obtener una mezcla húmeda, la cual se vierte en las probetas cilíndricas, tal cual se ve en las figuras 4, 5 y 6.

Confección del mezclado manual con suspensión mecánica

La mezcla MSM es la propuesta del presente trabajo. Mediante esta se modifica el proceso de mezclado de los componentes y, como se verá

en el acápite correspondiente a los resultados y su discusión, tiene incidencia en el comportamiento del concreto, tanto en el estado fresco como en el endurecido. Sus etapas son:

- Se prepara la cantidad de agua necesaria, y en el recipiente que la contiene se deposita paulatinamente el cemento, como se muestra en la figura 7.
- Se mezcla hasta dispersar el cemento en el agua, de lo que se obtiene una suspensión mecánica activa, tal cual se muestra en la figura 8.
- Se introduce el agregado fino en la suspensión mecánica activa, y se revuelve hasta obtener una mezcla homogénea dispersando los granos entre la pasta fluida, según se ve en la figura 9.



Figura 3. Mezclado del cemento con los agregados.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 4. Mezcla de agregados, cemento y agua.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 5. Mezcla de concreto en estado húmedo.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 6. Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm (MCV).
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 7. Preparación de los materiales.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 8. Mezcla del cemento con el agua: suspensión mecánica.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 9. Vertido del agregado fino en la suspensión mecánica.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 10. Se mezcla el agregado grueso con la pasta obtenida, mediante suspensión mecánica.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 11. Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm (MSM).
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY

- Finalmente, se vierte el agregado grueso y se revuelve hasta obtener la mezcla de concreto, listo para su colocación o su vaciado en las probetas cilíndricas, como se ve en las figuras 10 y 11.

Se hicieron el mismo diseño y la misma dosificación de materiales para ambas mezclas, ya que lo estudiado no era la sustitución de un material convencional, sino la metodología de mezclado. Los consumos de materiales se muestran en la tabla 4.

Ensayos de resistencia y durabilidad

Se confeccionaron muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, que luego fueron sumergidas en un tanque de curado con agua saturada de cal, a una temperatura de 23 + 3 °C, como se muestra en las figuras 12, 13 y 14. Las muestras se llevaron a la prensa hidráulica, para determinar su resistencia al esfuerzo de compresión a los 7, 14, 28 y 56 días. También

se analizaron muestras de concreto endurecido, para determinar su comportamiento en cuanto a absorción, densidad Bulk y porosidad. Para estos análisis se emplearon hornos de acuerdo con la ASTM C-642, prensa electrónica de falla a compresión y equipo para velocidad de pulso ultrasónico.

Resultados

Ensayos de resistencia al esfuerzo de compresión

Se confeccionaron quince muestras de concreto por cada una de las mezclas, para un total de 30, utilizando probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Se tomaron tres probetas por mezcla para cada edad de fallado, según la NTC 1377, equivalente a la ASTM C192M (Icontec, 1994). Los resultados se muestran en la tabla 5.



Figura 12. Preparación del agua con cal para el curado.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 13. Inmersión de las probetas para el curado.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Figura 14. Probetas de MCV y MSM para fallado a siete días.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY

Tipo de mezcla	Consumo de cemento (kg/m ³)	Consumo de agua en (kg/m ³)
MCV	386,50	184,65
MSM	386,50	184,65

Tabla 4. Consumo de cemento y agua.

Fuente: elaboración propia (2020).

Mezcla	Resistencia al esfuerzo de compresión (MPa)			
	7 días	14 días	28 días	56 días
MCV				
1	14,28	18,35	22,02	24,90
2	14,82	18,13	21,85	24,75
3	14,53	18,28	21,95	24,55
Promedio	14,54	18,25	21,94	24,73
MSM				
1	14,15	18,76	22,25	25,18
2	14,62	18,45	21,90	24,79
3	14,27	18,20	22,40	24,63
Promedio	14,35	18,47	22,18	24,87

Tabla 5. Resistencia al esfuerzo de compresión.

Fuente: elaboración propia (2020).

Se tomó como referencia la mezcla MCV, para hacer un comparativo en porcentaje en cuanto al comportamiento al esfuerzo de la compresión, partiendo, entonces, de que la mezcla MCV es el 100%, como se ve en la tabla 6.

Al hacer un promedio de las resistencias al esfuerzo de compresión de las cuatro edades de fallado se obtuvo que el de la mezcla MSM fue del 100,39%, en comparación con la mezcla de control, que fue la MCV, lo que indica un comportamiento ligeramente superior o a favor de la MSM; sin embargo, estadísticamente se los considera idénticos. Lo positivo de este resultado es que la nueva metodología de mezclado se comporta acorde con las exigencias de los parámetros del diseño de mezclas, sin afectación negativa, y alcanzando las resistencias de desempeño de los concretos ordinarios confeccionados en sectores populares, que son del orden de los 21,0 MPa, según NSR-10 (Decreto 926 de 2010).

Este resultado es coherente con el ensayo de asentamiento de las mezclas en estado fresco, ya que, como se pudo observar en la tabla 3, la mezcla MSM presentó un mayor asentamiento, en comparación con la mezcla MCV. Dichos asentamientos fueron de 7,20 cm y 6,90 cm, respectivamente, lo cual lleva a inferir que hay un óptimo acomodamiento de los materiales en la matriz del concreto (Figueroa & Palacio, 2010). En este sentido, la trabajabilidad de las mezclas en estado fresco para pequeños volúmenes fue mejor en el caso de la mezcla MSM, donde se notó una mejor lubricación de los componentes al momento de revolver los materiales, representada dicha percepción en un menor esfuerzo por parte de las personas participantes en la actividad de mezclado manual.

Ensayos de durabilidad

Si bien no hay diferencias significativas entre los dos tipos de mezclas en cuanto a la resistencia a compresión, tal como se mostró en el acápite anterior, interesa especialmente a esta investigación el comportamiento en cuanto a durabilidad, pues las construcciones a las que hace referencia esta investigación, y los volúmenes pequeños, de entre 0,25 m³ y 0,50 m³, se dan en ciudades que, como Bogotá, Medellín, Caracas, México y Santiago de Chile, presentan altos niveles de CO₂ atmosférico (Rosas et al., 2010, p. 12); así pues, el desempeño del material en estado endurecido en estos ambientes carbonatados es un aspecto importante, de cara a la vida útil de las estructuras y los recubrimientos a base de CPO.

Los ensayos realizados fueron: método de ensayo estándar para densidad, absorción y vacíos en el concreto según ASTM C642-06, como se ve en la tabla 7; MBE, y velocidad de pulso ultrasónico, como se muestra en la tabla 8. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Se puede observar que la mezcla MSM tiene un comportamiento, o un desempeño, mejor que el de la mezcla de referencia MCV. En cuanto a la densidad Bulk seca, también la MSM fue superior. En cuanto a los valores de absorción y porosidad del concreto endurecido, ambas mezclas presentaron un comportamiento acorde a los rangos expuestos por distintos investigadores; entre ellos, D. K. Nekrasov, quien expone que los concretos o los hormigones registran porosidades que oscilan entre el 20% y el 30%, o Aportela, quien con agregados calizos y una relación A/C de 0,50 obtuvo porosidades promedio del 23,3%. En cuanto a la absorción, los valores arrojados por las dos mezclas también se

➤ Tabla 6. Comportamiento comparado al esfuerzo de compresión.

Fuente: elaboración propia (2020).

Mezcla	Comparación esfuerzo de compresión (%)			
	7 días	14 días	28 días	56 días
MCV	100,00	100,00	100,00	100,00
MSM	98,69	101,21	101,09	100,57

➤ Tabla 7. Densidad, absorción y vacíos del concreto endurecido.

Fuente: elaboración propia (2020).

Mezcla	Absorción después de la inmersión y de hervir (%)	Densidad Bulk seca (g/cm ³)	Volumen de poros permeables vacíos (%)
MCV (1)	9,90	2,11	21,60
MCV (2)	10,10	2,09	21,70
Promedio MCV	10,0	2,10	21,65
MSM (1)	9,50	2,11	20,90
MSM (2)	9,60	2,11	21,00
Promedio MSM	9,55	2,11	20,95

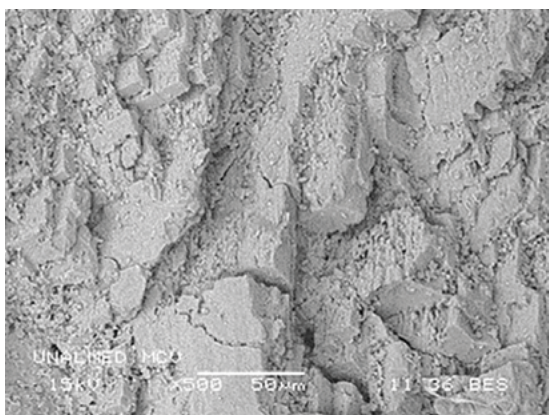
inscriben en el rango expuesto por D. K. Nekrasov, que está entre el 10% y el 20% (Olivares et al., 2004).

Microscopía de barrido electrónico

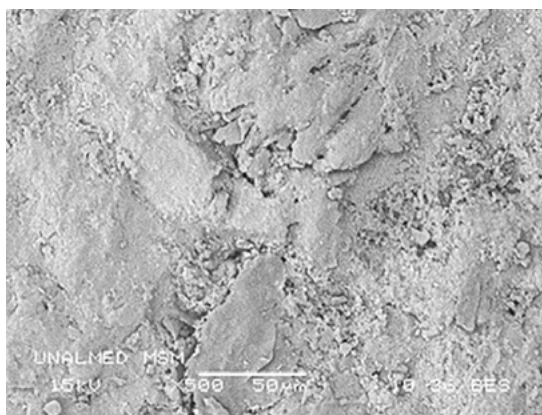
Tal como se puede ver en las MBE (figuras 15-20), la mezcla MSM presenta un comportamiento diferente del de la mezcla de referencia MCV, pues se observa una topografía de superficie más homogénea, menos porosa, en la medida en que se nota un mejor recubrimiento de los agregados por parte de la pasta; eso quiere decir que las partículas del cemento presentan una mayor dispersión, y por ello la suspensión mecánica cubre, de manera homogénea, el material inerte de relleno de la matriz cementante. A medida que aumentó el nivel de observación microscópica, se identificaron diferencias notorias en cuanto a la presencia

de poros y la exposición de agregados en el concreto endurecido, y para corroborar estas apreciaciones se procedió a hacer una lectura empleando la sonda química para microáreas del MBE, según se muestra en las figuras 21 y 22.

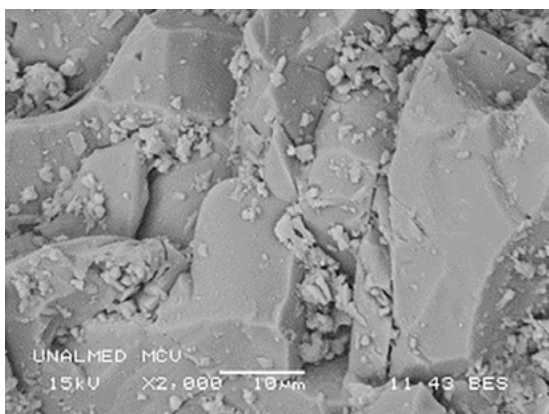
Como se observa en las figuras 21 y 22 la presencia de los componentes arrojados por la sonda química para microáreas coincide con la calidad de los cementos nacionales empleados para la confección de concretos a base de CPO (Tobón & Montoya, 2006). La presencia de potasio (K) en la MSM coincide con una etapa o fase de maduración de la pasta de cemento del concreto en estado endurecido, pero que generalmente se obtiene por mezclado mecánico, y no por mezclado manual, lo que es un importante logro de la presente investigación, pues se puede estar alcanzado una hidratación más completa del cemento (Franus & Panek, 2015, p. 105).



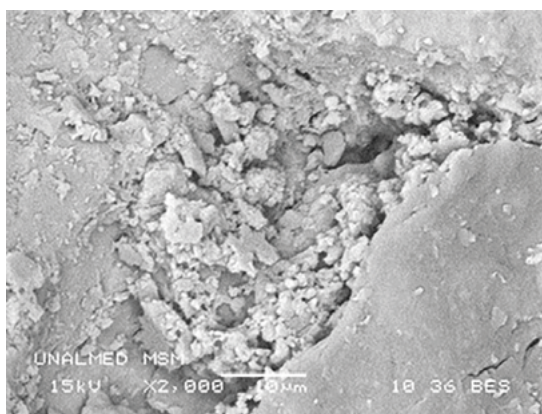
▲ Figura 15. MBE a 500X de la MCV.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



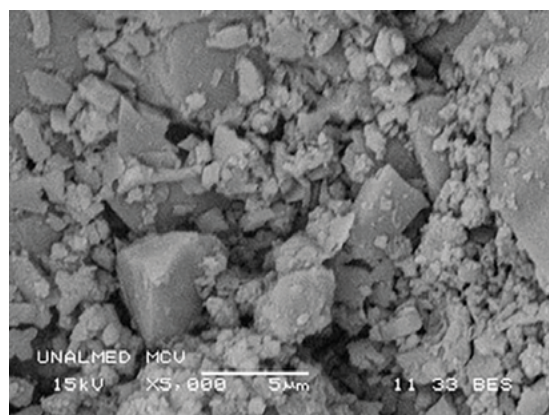
▲ Figura 16. MBE a 500X de la MSM.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



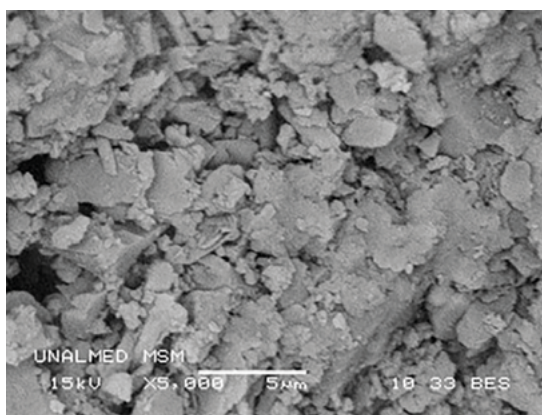
▲ Figura 17. MBE a 2 000X de la MCV.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



▲ Figura 18. MBE a 2 000X de la MSM.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



▲ Figura 19. MBE a 5 000X de la MCV.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



▲ Figura 20. MBE a 5 000X de la MSM.
Fuente: elaboración propia (2019). CC BY

Figura 21. Sonda química por MBE en la mezcla MCV.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY

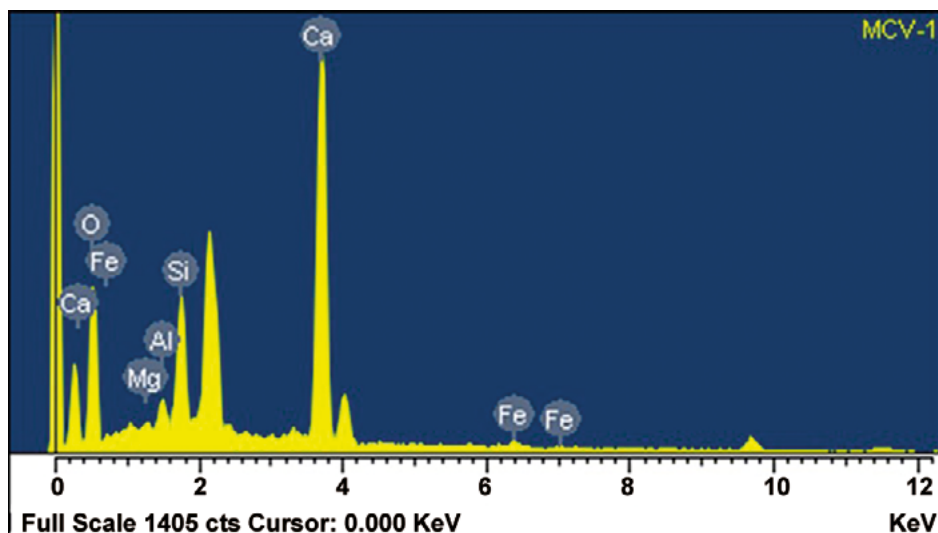
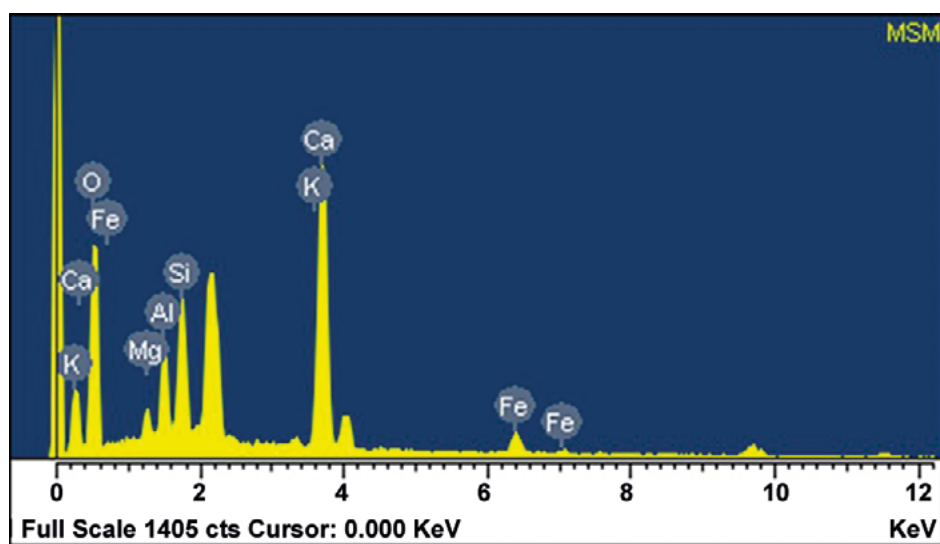


Figura 22. Sonda química por MBE en la mezcla MSM.

Fuente: elaboración propia (2019). CC BY



Según Malhotra, a un concreto que presenta una VPU entre 3660 m/s y 4575 m/s se lo considera bueno; por debajo de este rango se lo considera regular y por encima de este se considera excelente (Cruz et al., 2014). Para las mezclas de uso normal a las que se refiere esta investigación, y que están entre 21,0 MPa y 23 MPa, se considera óptimo un desempeño que se ubique en el rango de 3660 m/s y 4575 m/s.

Discusión

El desempeño de las muestras de MSM fue superior en todas las características al presentado por la MCV, sin requerir aditivos ni aumento del material cementante para obtener dicha cualificación reológica. Por ejemplo, la resistencia a la compresión, si bien estadísticamente hablando presentó un comportamiento idéntico en ambas mezclas, se mantuvo superior en la MSM, lo cual puede calificarse como un aspecto positivo de la metodología propuesta, ya que no hay afectación negativa de esta característica físico-mecánica, y se inscribe en la normativa exigida para concretos estructurales de sollicitaciones ordinarias, según NSR-10.

La investigación se realizó en el contexto urbano de Medellín (Colombia), ciudad que, al igual que Bogotá (Colombia), Caracas (Venezuela), Ciudad de México (México) y Quito (Ecuador), tiene un problema delicado de ambientes con alta presencia de CO₂, por lo que, además de analizar el comportamiento al esfuerzo de la compresión, se hace necesario el estudio del concreto endurecido en cuanto a porosidad, vacíos y densidad Bulk, ya que dichas características están directamente relacionadas con la durabilidad de los concretos, pues a mayor porosidad y volumen de vacíos en el concreto endurecido, existe mayor posibilidad de carbonatación y de pérdida de la pasivación del acero de refuerzo, en tanto que a una mayor densidad del material, menor es la posibilidad de filtración de CO₂ disuelto. En estas características, la mezcla MSM presentó un mejor comportamiento, en comparación con la MCV.

Muestra	Humedad de la muestra (%)	Velocidad (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
MCV (1)	13,25	3 911,0	3 903,5
MCV (2)	13,07	3 896,0	
MSM (1)	13,18	4 125,0	4 096,0
MSM (2)	13,10	4 067,0	

Tabla 8. Velocidad de pulso ultrasónico.

Fuente: elaboración propia (2020).

Velocidad de pulso ultrasónico

A continuación se muestran los resultados de las mezclas MCV y MSM. Todas las probetas cilíndricas se curaron durante 28 días, sumergidas en agua saturada con cal; luego se secaron durante siete días, a temperatura ambiente. Se midió el porcentaje de humedad de las probetas secas al aire y se procedió a medir la VPU, como se muestra en la tabla 8.

Se observa que la humedad de las probetas es uniforme en ambas mezclas. La MSM presentó una mayor VPU que la MCV, aspecto que es coherente con las características de trabajabilidad y asentamiento inicial, con la resistencia al esfuerzo de compresión y con las pruebas de porosidad. Si se toma como referencia el valor de la VPU de la MCV, entonces se encuentra que la MSM alcanza el 104,93%; o sea, es superior en 192,50 m/s.

Conclusiones

El análisis mediante el uso de MBE permitió observar un mejor comportamiento de la microestructura del concreto endurecido en la mezcla MSM; las imágenes a diferentes aumentos muestran un mejor recubrimiento de los agregados por parte de la pasta, como también, una distribución más homogénea de esta en la superficie; a su vez, la sonda química en microáreas mostró que en la MSM no hay afectación negativa de sus componentes; por el contrario, se observó una óptima activación del cemento, en comparación con la mezcla MCV, la cual se acercó más a una fase de maduración de hidratación de una mezcla confeccionada mecánicamente.

Otra característica a favor de la MSM es su desempeño al ensayo de VPU, al ser superior al de la MCV, lo cual indica un menor contenido de aire en el interior de la mezcla endurecida, y que contextos urbanos como los ya referenciados son perjudiciales para la durabilidad y la respuesta físico-mecánica de las estructuras de concreto, pues en las ciudades mencionadas no se dan los fenómenos de hielo-deshielo de países estacionales, por lo que las mezclas se confeccionan sin inclusores de aire y, por el contrario, buscando el menor número posible de poros. En este sentido, la VPU de la MSM fue coherente con los resultados de porosidad, densidad y resistencia a la compresión, lo cual permite concluir que sí hay una cualificación de la compacidad del concreto, y esta característica es relevante para el desempeño del concreto endurecido, en tanto

ya se ha comprobado que, a menor porosidad del material, mayor es su resistencia mecánica, como también lo es su durabilidad.

En general, se puede concluir que el procedimiento de MSM es un aporte a la construcción con alto impacto poblacional, como quiera que va encaminada a las obras pequeñas que confeccionan volúmenes de entre 0,25 m³ y 0,50 m³, donde se presenta el mayor consumo de cemento y agregados, y en cuyos procesos de construcción y autoconstrucción las comunidades suelen no tener acceso a medios de mezclado mecánico, y en ellas, entonces, se emplea más contenido de cemento para compensar la ausencia de tecnologías mecanizadas, que procuran una mejor compacidad de las mezclas. Por lo anterior, esta metodología se presenta como un aporte, desde la técnica y desde la sostenibilidad ecológica y económica, para una construcción sostenible de hábitats urbanos y rurales, por lo que corresponde a la academia, al gremio de la construcción y a las administraciones político-administrativas coadyuvar a su divulgación y su masificación.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación, como también, para el proceso de patente ante la Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia (NP 16136903).

Referencias

- Aguwa, J. (2010). Effect of hand mixing on the compressive strength of concrete. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, (17), 59-68. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.651.5943&rep=rep1&type=pdf>
- Cruz, R., Quintero, L. A., & Herrera, J. (2014). Evaluación del efecto de barras de refuerzo en concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 107-113. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19576>
- Figuroa, T., & Palacio, R. (2010). Pathologies, causes and solutions of architecture concrete in Medellín. *Revista EIA*, 5(10), 121-130. doi:<https://doi.org/10.24050/reia.v5i10.214>
- Franus, W., & Panek, R. (2015). *SEM investigation of microstructures in hydration products of Portland cement*. <https://pdfs.semanticscholar.org/d91f/8bd9386a82457d5c0990b76a5a83a3f046fa.pdf>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (1994). *NTC 1377 Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*. Icontec.
- Decreto 926 de 2010. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes Reglamento NSR-10. Marzo 19 de 2010. DO. 47656. https://www.adjurin.com/images/Pdf/5.Decreto_926_de_2010.pdf
- Olivares, M., Laffarga, J., Galán, C., & Nadal, P. (2004). Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad. *Revista Materiales de Construcción*, 54(273), 21-33. doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i273.220
- Rosas, J., Rosas, D., & Morillón, D. (2010). Saturation, energy consumption, CO₂ emission and energy efficiency from urban and rural households appliances in México. *Energy and Buildings*, 43, 10-18. doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.020
- Sakai, K. (2009, 20 November). Recycling concrete: the present state and future perspective. Presented in TCG-JSCE Joint Seminar, Athens, Greece. https://businessdocbox.com/Green_Solutions/76590841-Recycling-concrete-the-present-state-and-future-perspective.html
- Tobón, J., & Montoya L. (2006). Análisis comparativo entre algunas materias primas minerales nacionales e importadas utilizadas en la industria del cemento. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (19), 57-72. <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n19/n19a04.pdf>
- Turner, J. (2018). *Autoconstrucción. Por una autonomía del habitar*. Pepitas Ed. https://www.pepitas.net/sites/default/files/libros/primeras_paginas/Turnerprimeras.pdf

