

Materiales Cementantes Compuestos (ccm): estado del arte, situación actual y aplicaciones en la Ingeniería Civil

Carpio López Víctor Andrés¹, Viera Arroba Luisa Paulina²

^{1,2}Universidad Central del Ecuador
vacarpio@uce.edu.ec, lviera@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El presente artículo trata acerca del desarrollo de los materiales cementantes compuestos (CCM), desde el hormigón convencional hasta los más complejos como los compuestos con propiedades auto-reparantes y auto-sensitivas. Además, se hace una descripción de los estudios más relevantes de este tema, así como las propiedades que los CCM presentan y sus posibles aplicaciones en el desarrollo de nuevos materiales para la ingeniería civil.

Abstract

The present paper it is about the development of cementitious composite materials (CCM), from conventional concrete to more complex ones such as compounds with self-healing and self-sensing properties. In addition, a description is given of the most relevant studies of this topic, as well as the properties that the CCM present and their possible applications in the development of new materials for civil engineering.

1. Introducción

El estudio y uso de los compuesto cementantes para la construcción, según fuentes históricas data de hace 5600 años a. C., con la construcción más antigua realizada con conglomerado que corresponde al piso de una cabaña en Lepensky Vir (Serbia) (IECA, s.f.). Posteriormente, civilizaciones tales como las de Egipto, Grecia, y Creta emplearon morteros en diversas construcciones.

Alrededor del año 82 d.C., se desarrolla el primer hormigón, que es acreditado a los ingenieros romanos (Hendrik, 2005). Las mezclas de cemento Portland usadas en compuestos cementantes modernos fueron estudiadas inicialmente por Joseph Aspdin en 1824 (Carpio, 2014b)

A finales de 1930 se empiezan a utilizar aditivos químicos en el hormigón para modificar su viscosidad y fluidez (Aïtcin, 1998), naciendo así lo que se conoce como tecnología del hormigón, cuyo campo de estudio desde aquel entonces y hasta hoy en día no se enfoca en el entendimiento de las interacciones a nivel atómico-molecular del material sino mayormente en su comportamiento mecánico (Sedahat, 2014) (Lu et al., 2016).

En el año de 1998 con el desarrollo de los Engineered Cementitious Composites (ECC) (Li y Kanda, 1998), se introducen nuevos materiales en las mezclas del hormigón, por ejemplo, microfibras, mejorando las capacidades de resistencia mecánica del material, pero sin estudiarse a fondo, todavía, la interacción entre todos los materiales constituyentes del compuesto, como la capacidad auto-sensitiva (Han et al., 2015) o auto-raparante (Sierra et al., 2015). Con estudios de este tipo se abre un campo más amplio que es el de los materiales cementantes compuestos (cementitious composite materials “CCM”, en inglés) cuyos componentes y características son analizados a nivel cuántico.

Cabe aclarar que hoy en día debido al desarrollo de “hormigones flexibles” (bendable concrete), que emplean los criterios de los CCM para su elaboración, algunos investigadores han optado por emplear de manera equivalente al término CCM el de Engineered Cementitious Composites

(ECC). (Khmurovska y Stemberk, 2018) (Yildirim et al., 2018) (Yu, et al. 2018).

Los nuevos CCM constituyen un paso más allá de la tecnología del hormigón tradicional, estos se fundamentan en los más recientes avances de la ciencia e ingeniería de materiales (materials science and engineering “MSE”, en inglés). Los materiales constituyentes de los CCM y del hormigón tradicional inciden de manera distinta en el estudio de sus propiedades y desempeño físico-mecánico. Por lo que los CCM no pueden ser catalogados usando los criterios tradicionales del hormigón (Zhou, 2014) (Baera, 2015) (Hazelwood, 2015).

2. La ciencia e ingeniería de materiales (mse)

La MSE es un campo interdisciplinario que estudia y manipula la composición y estructura de los materiales a través de escalas de longitud para controlar sus propiedades por medio de la síntesis y el procesamiento (Askeland y Wright, 2017). Su objetivo final es caracterizar o describir a los materiales. La correlación de las distintas ramas que componen a la MSE así como el área de conocimiento específico de cada una se lo puede evidenciar mejor en la siguiente figura 1.

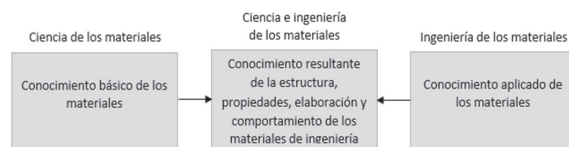


Figura 1. Correlación entre la ciencia y la ingeniería de los materiales. Fuente: Smith y Hashemi, 2006.

Los principios de la MSE se encuentran representados en el tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales (figura 2), donde el término “Propiedades” se refiere a la constitución química de un material; “Estructura” a la descripción del arreglo de los átomos, es decir, cómo se observa el material a diferentes niveles de detalle; el término “Síntesis” concierne a la forma en que se fabrican materiales a partir de sustancias químicas de estado natural o hechas por el hombre y “Procesamiento” implica cómo se transforman materiales

en componentes útiles para provocar cambios en las propiedades de otros materiales.

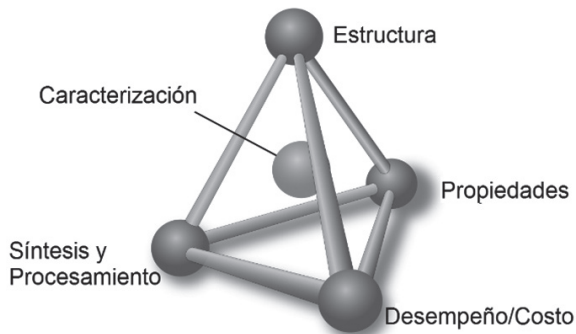


Figura 2. Tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales.
Fuente: Doug Hatfield

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

Dentro de la MSE existen diferentes formas de clasificar a los materiales. La manera más común en el caso de sólidos es agruparlos en tres categorías básicas: metales, cerámicos y polímeros. Según lo manifiestan Callister y Rethwisch (2009), esto se lo realiza considerando su composición química y estructura atómica. Pero, además, se toma en cuenta otro grupo concerniente a los materiales compuestos, mismos que son el resultado de una ingeniosa combinación de dos o más materiales diferentes. Como ejemplo de lo expuesto, en la figura 3 se puede observar un gráfico de valores de rigidez, a temperatura ambiente, donde se correlacionan las categorías anteriores y algunos de los materiales que son contenidos en éstas.

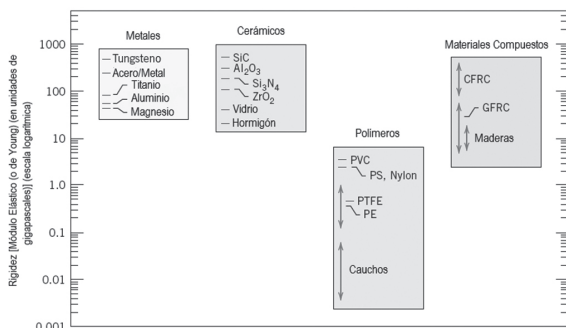


Figura 3. Gráfico de barras temperatura ambiente – valores de rigidez (módulo de elasticidad). Fuente: Callister y Rethwisch, 2009.

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

3. La ciencia de los materiales en la ingeniería civil

La relación entre la MSE y la ingeniería civil data desde los inicios de la civilización humana, evolucionando con el pasar del tiempo desde los niveles más básicos del conocimiento empírico hasta constituirse hoy como ramas de estudio técnico-científicas (Quora, 2015) (Gupta y Chander, 2017).

En la ingeniería civil, los materiales y la materia en general (desde el contexto físico) juegan un rol muy importante, ya que es a través de ellos que los proyectos de infraestructura se hacen realidad. Las estructuras y los materiales en su mayoría son estudiados conforme los criterios y conceptos de la mecánica del medio continuo misma que estudia el comportamiento de los sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos mediante la aplicación de modelos matemáticos que aportan una mejor comprensión sobre sus propiedades físico-mecánicas (Reedy, 2013).

Sin embargo, el constante avance en áreas aplicadas del conocimiento como es el caso de la tecnología del hormigón, donde la profundidad de algunos temas investigados ha sobrepasado la competencia de la mecánica del medio continuo (continuum mechanics, en inglés), como se evidencia al estudiar los modelos de sensibilidad característica de hormigones auto-sensibles basados en polvo de nickel donde Han et al. (2015) consideran los efectos cuánticos dentro del material. Esto ha fomentado que la MSE incorpore nuevas áreas de estudio con la finalidad de dar solución a los diferentes problemas que se presentan actualmente en la ingeniería.

Una de estas áreas es la de los materiales compuestos, la cual estudia la interacción entre las combinaciones o mezclas de dos o más materiales a fin de caracterizar no solo sus propiedades físico-mecánicas y químicas sino además entender su composición y estructuración desde niveles atómicos a macroscópicos y con esto ver su aplicabilidad en las diferentes ramas de la ingeniería. En la figura 4 se puede observar un esquema de clasificación para varios tipos de materiales compuestos (Callister y Rethwisch, 2009).

Según la ciencia de ingeniería de los materiales (MSE) todos los compuestos cementantes (sin inclusión de fibras) son estudiados dentro de los materiales compuestos reforzados con grandes partículas (Large Particle Reinforced Composites, en inglés) lo cual es correcto si se considera que las interacciones partícula-matriz no son tratadas a nivel atómico o molecular tal y como lo mencionan Callister y Rethwisch (2009), es decir, si el estudio se lo realiza desde un nivel nano -a macro- estructural desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo.

Sin embargo, si a los hormigones y ECC se les realiza diferentes adiciones químicas y minerales como los materiales cementantes suplementarios (supplementary cementitious materials “SCM”, en inglés), aditivos químicos modificadores visco-reológicos (HRWR, por sus siglas en inglés) y adiciones de nanocompuestos, que modifican la composición química de la matriz así como la inclusión en algunos casos “conjunta” de fibras de refuerzo, sería un error clasificarlos específicamente dentro de alguna de las categorías mostradas en la figura 4.

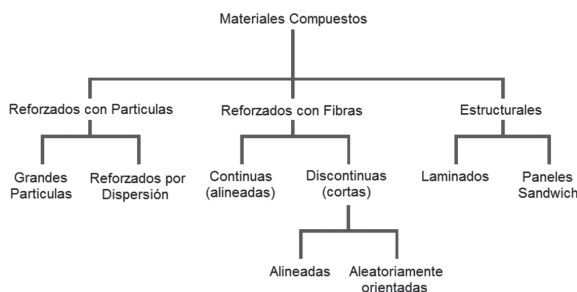


Figura 4. Esquema de clasificación para varios tipos de materiales compuestos. Fuente: Callister y Rethwisch, 2009.

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

La tecnología del hormigón desde la conceptualización de investigadores como Aitcin (1998), Neville y Brooks (2010), Li (2011b) y Xincheng (2017) estudia única y exclusivamente al hormigón desde su composición a nivel molecular, meso-/macroscópico hasta su interacción con el ambiente. También comprende los estudios sobre su elaboración, proceso de producción, usos,

comportamiento físico-mecánico y clasificación de los diferentes tipos de hormigones creados. Pero, hoy en día debido a la profundidad a la que ha llegado la investigación de este material sumado al extenso listado de tipos de hormigón que siguen en desarrollo; se pone en tela de duda si se debe continuar llamando hormigón a un material compuesto que ha alcanzado un alto grado de complejidad, y más aún, si debe continuarse nombrando a la rama que lo estudia como *tecnología del hormigón*.

Es así que en la actualidad investigadores como Baera (2015) y Hazelwood (2015) hablan ya de materiales cementantes compuestos (CCM) en vez de hormigones especiales o de algún otro tipo.

4. Los materiales cementantes compuestos (ccm)

El estudio de los CCM se deriva de un campo más amplio que son los materiales compuestos de matriz cerámica (Ceramic Matrix Composites “CMC”, en inglés) (Olivares et al., 2003) (Askeland y Wright, 2017) desarrollados generalmente a base de cemento Portland. Los materiales constituyentes de los CCM por lo general, son: agua, cemento, agregado fino, agregado grueso, adiciones minerales, adiciones químicas, nanocompuestos o nanomateriales y fibras (Bang et al., 2015).

Actualmente, los criterios sobre tecnología del hormigón que eran estudiados hace más de medio siglo han evolucionado de tal manera que, como fue mencionado anteriormente, es complicado establecer a ciencia cierta las categorías en las que se deben ubicar a los diferentes compuestos cementantes desarrollados, tal como es el caso de los hormigones de ultra-alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés) reforzados con nanocompuestos (Badak et al., 2014) (Sedahat et al., 2014) (Zhou, 2014) (Lu et al., 2016) (Lu y Ouyang, 2017) o el de los diferentes tipos de hormigón con inclusiones de materiales y compuestos que le aportan propiedades como la auto-reparación (Hazelwood, 2015).

A diferencia de compuestos cementantes como el hormigón, los CCM presentan propiedades mecánicas mucho mayores que lo convencional para materiales de características anisotrópicas, por ejemplo, su flexibilidad y ductilidad son superiores, tal que, a pesar de llegar a deformarse considerablemente, pueden volver a su estado original sin evidenciar pérdidas sustanciales en sus capacidades resistivas a esfuerzos de compresión, tracción, corte e inclusive impacto. Esta capacidad y adaptabilidad de recuperación de la energía de deformación de un material es conocida de manera ingenieril como “resiliencia” (Fisher, 2006).

Muchas de estas cualidades han sido estudiadas por Baera et al. (2015), quien además menciona que:

“Los compuestos a base de cemento han probado, con el pasar del tiempo, ciertas habilidades de auto-reparar los daños (fisuras y especialmente microfisuras) que ocurren dentro de su estructura. Dependiendo del nivel de daño y del tipo de compuesto en que ocurre, la auto-reparación puede variar desde el cierre de una fisura o reparación de una fisura al estado de parcial o incluso completo de recuperación de las propiedades físico-mecánicas del material” (p. 12).

Respecto a CCM ligeros y ultraligeros, su estudio a nivel mundial ha quedado relegado en parte al área del hormigón donde se han desarrollado mezclas ligeras (LWC, por sus siglas en inglés) (Esmaeili, 2012) y de alto desempeño reforzado con fibras (HPLWFRC, por sus siglas en inglés) (Carpio, 2014a) (Hamad, 2017) empleando agregados de baja densidad como arcilla expandida, esquistos y pizarras, pero cuya accesibilidad para la industria de la construcción es limitada (Short y Kinniburgh, 1963). Debido a esto, el empleo de granulado de poliestireno expandido (EPS) como alternativa para la fabricación de LWC ha sido estudiado en diferentes trabajos como los de Limuta y Zhunio (2015), Mulla y Shelake (2016), Carrera y Cevallos (2016), donde se muestra que el uso de EPS abre una nueva alternativa para la elaboración de materiales ligeros a base de cemento.

La tendencia actual de obtener CCM ligeros y ultraligeros ha fomentado el uso de SCM, lo que se evidencia en las investigaciones de Yeginobali et al. (1998), Sajedi y Shafigh (2012), Carpio (2014a) y Hamad (2017). En algunos de estos trabajos se realizan inclusiones de fibras de refuerzo metálicas, sintéticas, naturales o recicladas para mejorar aún más el desempeño mecánico del material, tal y como lo muestran Sadrmomtazi et al. (2014) en su estudio.

Por otro lado, dentro de los CCM, los ECC conforme lo manifiestan Li (2008), Li y Kanda (1998), son una variante a los hormigones de alto desempeño reforzados con fibras (HPFRC, por sus siglas en inglés) cuya diferencia principal radica en el comportamiento que este presenta ante la acción de una carga. El comportamiento del ECC una vez se presenta la primera grieta es de una “deformación con endurecimiento” (strain-hardens, en inglés) a diferencia de un FRC (hormigón reforzado con fibras, en español) que después de la primera grieta muestra un “suavizado por tensión” (tension-softens, en inglés), esto puede ser apreciado de mejor manera en la figura 5. Al igual que los hormigones, a los ECC se los ha intentado categorizar en familias de acuerdo a sus resistencias a tensión y ductilidades, determinándose así las siguientes: ECC Auto-compactante (Self-consolidating ECC, en inglés), ECC de Alta resistencia inicial (High early strength ECC “HES-ECC”, en inglés), ECC Ligero (Light-weight ECC “LW-ECC”, en inglés), ECC Verde o Ecológico (Green ECC “G-ECC”, en inglés) y ECC Auto-reparador (Self-healing ECC “SH-ECC”, en inglés).

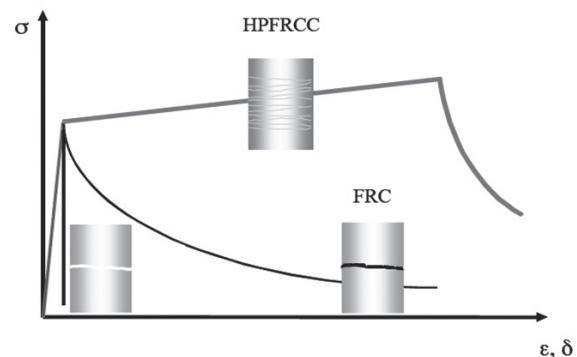


Figura 5. Relación esfuerzo-deformación en tensión uniaxial del hormigón, FRC, y HPFRC. Fuente: Li, 2008.

Si se observa detenidamente las categorías de los ECC indicadas por Li (2008), en relación con los conceptos de la tecnología del hormigón estos también podrían ser catalogados como UHPC conforme las definiciones mostradas desde las investigaciones de Collepardi et al. (1997) pasando por Fehling et al. (2008) hasta Graybeal (2013).

En la figura 6, se presenta una alternativa para la clasificación de los hormigones, ECC y compuestos cementantes en general dentro de una macro-área de estudio conocida como los materiales cementantes compuestos (CCM), convirtiéndose así en la rama de los CMC que abarca desde los

conceptos más elementales de la Tecnología del Hormigón en la Física Clásica hasta las aproximaciones a nivel de la Física de la Materia Condensada.

En la tabla 1, se presentan valores característicos de algunas propiedades mecánicas relevantes de los CCM; dichos valores mostrados corresponden a los más críticos obtenidos en diversas investigaciones, ofreciendo así una base comparable de la capacidad físico-mecánica que presentan las diferentes categorías de CCM mostradas en la figura 6.

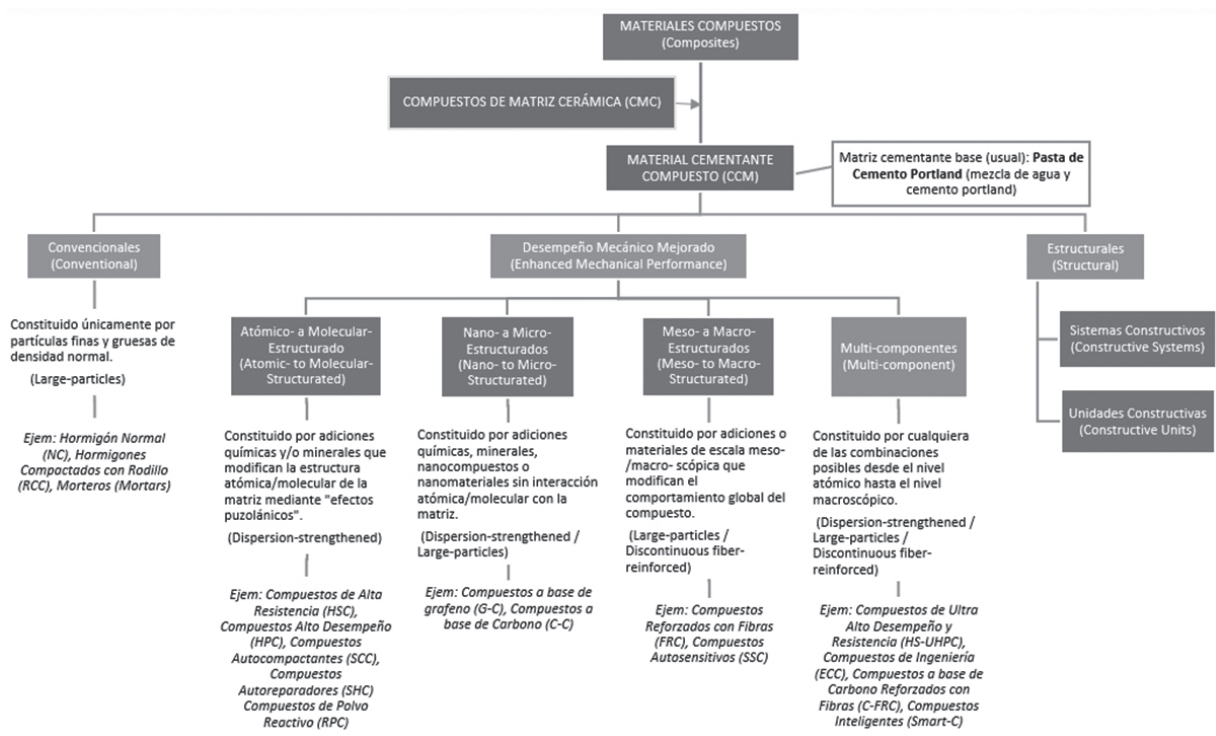


Figura 6. Propuesta para la clasificación de los materiales cementantes compuestos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Valores Característicos de algunas propiedades mecánicas de los diferentes materiales cementantes compuestos.

Fuente: Elaboración propia

Categoría	Sub-categoría	Esfuerzo a Compresión (MPa)	Esfuerzo a Tracción Último (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo a Flexión (MPa)	Densidad (gr/cm ³)	Auto-Reparación	Auto-Sensibilidad
CCM Convencional	-	hasta 38 ⁸	hasta 3 ⁸	hasta 30 ⁸	hasta 6 ⁸	2.3 a 2.5 ³	NO	NO
CCM Desempeño Mecánico Mejorado	Atómico- a Molecular-estructurado	hasta 180 ²	hasta 4 ²	hasta 32 ²	hasta 16 ²	2.3 a 2.5 ³	NO	SI ⁴
	Nano- a Micro-Estructurado	hasta 217 ¹	hasta 4 ¹	hasta 70 ¹	hasta 30 ¹	2.3 a 2.6 ^{3,7}	NO	SI ⁴
	Meso- a Macro-Estructurado	hasta 190 ¹	hasta 6 ¹	hasta 45 ¹	hasta 20 ¹	0.4 a 2.6 ^{3,7}	NO	SI ⁴
	Multi-componente	hasta 217 ¹	hasta 6 ¹	hasta 70 ¹	hasta 30 ¹	0.4 a 2.6 ^{3,7}	SI ⁶	SI ⁴
Estructurales	-	-	-	-	-	-	SI ⁶	SI ^{4,5}

¹ Willey Loh., 2015

² Kusumawardaningsih et al., 2016

³ FHWA., 2013

⁴ Han et al., 2015

⁵ Wang et al., 2012

⁶ Vijay et al., 2017

⁷ Balakrishna, 2013

⁸ Madhkhan, 2015

Nota: En los CCM Estructurales sus propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los materiales constituyentes, pero conforme los criterios de la MSE, la determinación de sus capacidades estructurales son aproximados perfectamente en base a los conceptos de la Mecánica de Sólidos. (Callister y Rethwisch, 2009) (Askeland y Wright, 2017)

5. Propiedades de los materiales cementantes compuestos

En los CCM al ser su matriz constituyente más común, la pasta de cemento Portland, sus propiedades presentan similitud con las evidenciadas en mezclas de hormigón o compuestos cementantes como los morteros, tal como se reporta en algunas investigaciones: Fehling et al. (2008), Zhou (2014), Baera et al. (2015), entre otros; por lo cual se pueden establecer dos estados principales del material: el Estado Primario o conocido también como “Fase Líquida” y el Estado Secundario o “Fase Sólida”. En cada uno de dichos estados el material presenta comportamientos reológicos diferentes por lo cual es necesario definirlos para tener una comprensión mayor sobre sus características.

A. Estado Primario (Fase líquida).

Este estado es el inicial del CCM y es caracterizado por presentarse como una masa líquida y que según los materiales constituyentes del que esté elaborado el CCM dependerá su grado de fluidez

y viscosidad que a su vez son los parámetros reológicos predominantes para este estado. Esta masa líquida es obtenida después de ingresar todos los materiales con los que se fabrica el CCM en una máquina mezcladora por un lapso de tiempo determinado. Entre las propiedades más relevantes que se pueden evaluar en consideración con lo expresado en el Manual de la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés) de Kostmatka et al. (2004) para el caso de mezclas de hormigón, se tiene: *consistencia, trabajabilidad, homogeneidad, exhudación, fraguado.*

B. Estado Secundario (Fase sólida).

Luego de transcurrido el proceso de fraguado del CCM, este adquiere un estado sólido y macizo, por eso suele decirse en el caso del hormigón que éste presenta una apariencia similar a la de una “roca artificial”. En este estado el CCM muestra propiedades físicas, químicas y mecánicas muy diferentes al estado primario.

En el caso de los CCM las principales propiedades

mecánicas que pueden estudiarse son: densidad, ductilidad, dureza, elasticidad, rigidez, tensión mecánica, viscoelasticidad.

6. Aplicaciones de los materiales cementantes compuestos

Aun cuando en la actualidad el desarrollo de los CCM se encuentra en fase experimental, se han realizado diversas aplicaciones a nivel constructivo para evaluar su comportamiento en el mediano y largo plazo. Una de estas aplicaciones estudiada por Rokugo et al. (2005) analiza el comportamiento del ECC empleado como material de reparación en un muro a gravedad para contención de tierra que fue severamente dañado con agrietamientos por una reacción Alkali-Sílice (ASR, por sus siglas en inglés). En dicho estudio se realizó el análisis entre un mortero de cemento portland convencional y un ECC, y los resultados obtenidos demostraron que luego de un mes de aplicar los métodos de reparación, el mortero se vio nuevamente afectado por la ASR tal que, luego de 2 años se había producido una grieta con un ancho de 300 μm , mientras que el ECC luego del mismo periodo de tiempo apenas presentó un agrietamiento de 120 μm .

7. Conclusiones

Las continuas modificaciones y desarrollo de nuevos hormigones cada vez con composiciones más complejas, dificulta su caracterización y clasificación dentro de alguna de las categorías que la tecnología del hormigón tradicional ha establecido. Por consiguiente, los CCM se perfilan como una nueva rama de estudio capaz de abarcar la conceptualización tradicionalista de los hormigones y los nuevos desarrollos en las mezclas a base de cemento portland.

La interacción entre los niveles de nano-, micro-, meso- y macro- estructuración que hoy en día se estudia en los CCM permite obtener una comprensión mayor sobre su comportamiento mecánico. Características como la durabilidad del material, conductividad, resiliencia, entre otras, que antes eran estimadas mediante exhaustivas

pruebas experimentales en laboratorio hoy se las podría estudiar de manera directa con la ayuda de análisis computacionales mediante modelación multifísica, logrando de esta manera una optimización de recursos y tiempo.

Las interacciones químicas que tienen lugar en la matriz cementante de los CCM como consecuencia de las diferentes adiciones químicas y minerales, hoy son estudiadas a profundidad con los conocimientos incorporados por la MSE, sin embargo, han sido consideradas durante décadas por la tecnología del hormigón como un parámetro empírico validado únicamente por las diferentes pruebas de laboratorio sin llegar a una comprensión total sobre su rol fundamental.

El empleo de los CCM en el campo de la construcción, hoy en día se encuentra en una fase de estudio experimental a nivel de factibilidad con excelentes resultados, por lo que a futuro se perfila como una alternativa sustentable y sostenible frente al hormigón tradicional como hoy se lo conoce.

El estudio de los CCM permite encontrar materiales que respondan a necesidades particulares de forma más eficiente.

8. Referencias

- AÏTCIN P.-C. (1998). High-Performance Concrete, E&FN Spon, London, UK.
- ASKELAND, D. R., Wright, W. J. (2017). Ciencia e ingeniería de materiales, 7ma edición, Cengage Learning Editores S.A., México, D.F.
- BADAK, F., Abolfazl, H., Alimorad. R., Parviz. G. (2014). Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites. The Scientific World Journal, Volumen 2014. Artículo ID 276323. 10 págs. Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2014/276323
- BAERA, C., Mircea, C., Szilagyi. H. (2015). Cementitious Composite Materials with im-

- proved Self-Healing Potential. Constructii, Bucharest. Romania.
- BALAKRISHNA, B. (2013). Cellular Concrete. An alternative for sustainable design & Construction. The Masterbuilder.
- BANG, J., Prabhu, G., Jang, Y., Kim, Y. (2015). Development of Ecoefficient Engineered Cementitious Composites Using Supplementary Cementitious Materials as a Binder and Bottom Ash Aggregate as Fine Aggregate. International Journal of Polymer Science, Volumen 2015. Artículo ID 681051. 12 págs. Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2015/681051
- BARBERO, M., Flores, N., Guardia, C. (2017). Influence of the addition of waste graphite powder on the physical and microstructural performance of hydraulic lime pastes. Construction and Building Materials, Volumen 149, 15 de septiembre 2017, págs. 599-611, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.156
- CALLISTER, W. D., Rethwisch, D. G. (2009). Materials Science and Engineering: An Introduction, 8va edición. Hoboken: John Wiley.
- CARPIO, V. (2014a). Memorias de investigación sobre hormigones ligeros de alto desempeño reforzados con fibras "HPLWFRC" para el concurso ACI FRC Bowling Ball Competition 2014. Reno/Nevada, EE.UU.
- CARPIO, V. (2014b). Módulo estático de elasticidad del hormigón - Caso: ECUADOR. "Estudio, investigación final e informe global de las tesis sobre módulo de elasticidad del hormigón realizadas en la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador, 2014, 39 págs. ISBN: 978-9942-20-405-9
- CARPIO, V., Molina, M. (2016). Análisis experimental de un hormigón elaborado con residuos industriales de polvo de grafito. Ponencia del área de infraestructura, desarrollo urbano, industria e innovación, IV Congreso REDU. Investigación que obtuvo el 2do lugar en el Concurso de Pósters Científicos. Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Sangolquí, Ecuador. Recuperado de <http://www.redu.edu.ec/images/MEMORIAS-IV-CONGRESO-2016-Comprimido.pdf>
- CARRERA, D., Cevallos, D. (2016). Bases de diseño para la construcción sostenible con bloque alivianado con poliestireno (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito - Ecuador.
- COLLEPARDI, S., Coppola, L., Troli, L., Collepardi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. ACI Special Publication, Volumen: 173 (1), págs. 1-22
- ESMAEILI, K. (2012). Elastic Composite Reinforced Lightweight Concrete as a type of Resilient Composite Systems. International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering (IJITCE), Volumen 2, No.8. ISSN: 2 045-8711, Agosto 2012.
- Federal Highway Administration Research and Technology (FHWA). (2013). Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. CHAPTER 3. MECHANICAL PROPERTIES. FHWA-HRT-13-060.
- FEHLING, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (2008). Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, March 05-07, 2008. Kassel: Kassel University Press.
- FISHER, F. (2006). Chapter 15: Stress analysis. Myer Kutz. Mechanical Engineers' Handbook: Materials and mechanical design. Volumen 1, 3ra edición. John Wiley & Sons, Inc.
- FLORES, N., Barbero, M., Bustamante, R. (2017). Filler de grafito reciclado de EDM en pastas de yeso. Anales de edificación, Volumen 3, No. 2, págs. 27-38 (2017), ISSN: 2444-1309, DOI: 10.20868/ade.2017.3569

- GUPTA, R.B., Chander, S. (2017). *Material Science [For Civil Engineering]*. Satya Prakashan. New Delhi. India.
- GRAYBEAL, B. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. FHWA-HRT-13-060. Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/13060.pdf>
- HAMAD, A. J. (2017) Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Volume 29, Issue 4, 2017, Pages 373-380, ISSN 1018-3639. DOI: 10.1016/j.jksues.2015.09.003
- HAN, B., Yu, X., Ou, J. (2015). *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Butterworth-Heinemann. Elsevier. DOI: 10.1016/C2013-0-14456-X
- HAZELWOOD, T. (2015). *Investigation of a novel self-healing cementitious composite material system (tesis de doctorado)*, Cardiff University.
- HENDRIK, G. (2005). *Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data*. US Dept. of the Interior & US Geological Survey.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). (s.f). *Historia del cemento*. Recuperado de <https://www.ieca.es/historia-del-cemento/>
- KHMUROVSKA, Y., Štemberk, P. (2018). Comparison of engineered cementitious composites and concrete for strengthening of concrete structural details using RBSM. *MATEC Web of Conferences* 146, 02004. 9th International Scientific Conference Building Defects (Building Defects 2017). DOI: 10.1051/mateconf/201814602004
- KOSMATKA, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association. Skokie/Illinois, EE.UU.
- KUSUMAWARDANINGSIH. Y., Fehling. E., Ismail. M., Aboubakr. A. A. M. (2015). Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC, *Procedia Engineering*, Volume 125, 2015, Pages 1081-1086, ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.166.
- LI, V.C. (2008). *Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance*. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Capítulo 24, Ed. E. Nawy, CRC Press.
- LI, V. C., Kanda, T. (1998). *Engineered Cementitious Composites for Structural Applications*. *ASCE J. Materials in Civil Engineering*, Volumen 10, No. 2, págs. 66-69, 1998.
- LI, Z. (2011b). *Advanced Concrete Technology*, 2da edición. John Wiley & Sons, Inc.
- LITUMA, M., Zhunio, B. (2015). *Influencia de las perlas de poliestireno expandido (EPS) en el peso y en la resistencia a compresión del hormigón (tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca – Ecuador.
- LU, L.L., Ouyang, D. (2017). Properties of Cement Mortar and Ultra-High Strength Concrete Incorporating Graphene Oxide Nanosheets. *Nanomaterials* 2017, 7, 187. DOI:10.3390/nano7070187
- LU, L.L., Ouyang, D., Xu, W.T. (2016). Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Materials* 2016, 9, 419. DOI: 10.3390/ma9060419
- LU, S., Sun, L., Zhang, J., Hu, H., Lei, Y., Hou, Y. (2017). High/Ultra-high Performance Graphene Oxide/Cement-based Composites with Large-scale, Ordered and Compact Flower-like Microstructures. *Cailiao Daobao/Materials Review*. 31. 78-84. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.023.010

- MADHKHAN, M., Nowroozi, S., Torki, M. E. (2015). Flexural strength of roller compacted concrete pavements reinforced with glass-roved textiles. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 55, No. 1 (2015) 000-00. DOI: 10.12989/sem.2015.55.1.000
- MULLA, A., Shelake, A. (2016). Lightweight Expanded Polystyrene Beads Concrete. *International Journal of Research in Advent Technology* (E-ISSN: 2321-9637), Special Issue, National Conference, "VishwaCon'16", 19 de Marzo de 2016.
- NEVILLE, A. M., Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*, 2da edición Prentice Hall, Harlow, UK.
- OLIVARES, M., Galán, C., Roa, J. (2003). Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, Volumen 54, No. 484, marzo-abril 2003. España.
- QUORA. (2015). What is the relation between civil engineering and material science? [Mensajes en un blog]. Recuperado de <https://www.quora.com/What-is-the-relation-between-civil-engineering-and-material-science>
- REEDY, J.N. (2013). *An Introduction to Continuum Mechanics*, 2da edición. Cambridge University Press.
- ROKUGO, K., Kunieda, M., Lim, S.C. (2005). Patching repair with ECC on cracked concrete surface. *Proc. CONMAT 5*.
- SADRMOMTAZI, A., Mirgozar M.A., Fasihi, A., Haghi, A. K. (2009). An investigation on effect of using PP fibers and different cementitious materials on mechanical properties of EPS concrete. *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete & Development*, págs. 1035–1044.
- SAJEDI, F., Shafigh, P. (2012). High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volumen 37, October 2012, Issue 7, págs 1885–1893.
- SEDAHAT, A., Ram, M., Zayed, A., Kamal, R., Shanahan, N. (2014). Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications. *Open Journal of Composite Materials*. DOI: 10.4236/ojcm.2014.41002
- SHORT, A., Kinniburgh, W. (1963). *Lightweight Concrete*. CR Books.
- SIERRA, M. G., Jonkers, H. M., Mera, W. (2015). Field Application of Self-healing Concrete with Natural Fibres as Linings for Irrigation Canals in Ecuador. Recuperado de http://icshm2015.pratt.duke.edu/sites/icshm2015.pratt.duke.edu/files/u9/ICSHM2015_MGSB_255_0.pdf
- SMITH, W. F., Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4ta edición. Mc-Graw Hill.
- VERNET, C. (1995) Mécanismes chimiques d'interactions ciment-adjuvants, CTG Spa Guerville Service Physico-Chimie du Ciment, Janvier, 10 págs.
- VIJAY, K., Murmu, M., Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 2017, Págs 1008-1014, ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040.
- WANG, Y., Li, Y., Ran, J., Cao, M. (2012). Experimental Investigation of a Self-Sensing Hybrid GFRP-Concrete Bridge Superstructure with Embedded FBG Sensors. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks*, Volumen 2012, Artículo ID 902613, 10 págs. DOI: 10.1155/2012/902613
- WILLE, K., Loh, K. (2015). Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* · December 2010. DOI: 10.3141/2142-18
- XINCHENG, P. (2017). *Super-High-Strength High Performance Concrete*. CRC Press.

YEGINOBALI, A., Sobolev, K. G., Soboleva, S. V., Tokyay, M. (1998). High Strength Natural Lightweight Aggregate Concrete with Silica Fume. ACI Special Publication, Volumen: 178, Junio 1, 1998, págs. 739-758. Recuperado de <https://people.uwm.edu/sobolev/files/2016/10/CANMET-ACI-SP178-38-19q3t5j.pdf>

YILDIRIM, G & Şahmaran, M, Anıl, Ö. (2018). Engineered cementitious composites-based concrete. 387-427. DOI: 10.1016/B978-0-08-102181-1.00015-0

YU, K., Jiangtao, Y., Dai, J-G., Lu, Z-D., P Shah, S. (2018). Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. Construction and Building Materials. 158. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040

ZHOU, F. (2014). Investigation on Properties of Cementitious Materials Reinforced by Graphene (tesis de maestría). University of Pittsburgh, EE.UU.