CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE CONCRETOS ALCALINOS BASES PUMICITA PARA SU USO EN LAS VÍAS TERRESTRES

I. R. HERNÁNDEZ-CABRERA¹, E. E. MALDONADO-BANDALA²,
J. I. ESCALANTE-GARCÍA³, H. E. HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ², D. NIEVES-MENDOZA²

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana,
Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Gonzalo Aguirre Beltrán s/n,
Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.

³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica
no. 1062, Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico de concretos fabricados con Pumicita (P) activada alcalinamente, con diferentes porcentajes de activantes. Se prepararon 9 mezclas con sustitución del 30 al 70% en peso de cemento Portland (CP) por P, evaluando la resistencia a la compresión, módulo de ruptura y tensión por compresión diametral. Se encontró que al incrementarse en más del 30% de pumicita, en 7 mezclas disminuyen dichos parámetros, entre el 20 y 50%; 5 y 20%; y entre el 12 y 38% respectivamente. Las mezclas con 50% de pumicita y 10% de activantes, y 30% de pumicita y 6% de activantes presentaron resistencias mecánicas semejantes a las hechas con CP.

Palabras clave: Pumicita; concreto activados; resistencia mecánica.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the mechanical behavior of concrete manufactured with Pumicite (P) activated alkaline, with different percentages of activants. 9 mixtures were prepared with substitution of 30 to 70% by weight of Portland cement (CP) per P, evaluating the compression resistance, modulus of rupture and tension by diametral compression. It was found that when increasing in more than 30% of pumicite, in 7 mixtures these parameters decrease, between 20 and 50%; 5 and 20%; and between 12 and 38% respectively. The mixtures with 50% of pumicite and 10% of activants, and 30% of pumicite and 6% of activants presented mechanical resistance similar to those made with CP.

Keywords: Pumicite; concrete activated; mechanical strength.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de concretos fabricados com Pumicita (P) ativada alcalina, com diferentes porcentagens de ativantes. Foram preparadas 9 misturas com substituição de 30 a 70% em peso de cimento Portland (CP) por P, avaliando a resistência à compressão, módulo de ruptura e tensão por compressão diametral. Verificou-se que ao aumentar em mais de 30% de pumicite, em 7 misturas estes parâmetros diminuem, entre 20 e 50%; 5 e 20%; e entre 12 e 38% respectivamente. As misturas com 50% de pumicita e 10% de ativantes e 30% de pumicita e 6% de ativantes apresentaram resistência mecânica similar àquelas feitas com PC.

Palavras-chave: Pumicite; concreto ativado; resistência mecânica

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, uno de los principales materiales empleados desde hace décadas para la elaboración de la infraestructura como son casas, edificios, calles, carreteras, puentes, muelles, aeropuertos, etc., es el concreto reforzado, elaborado con cemento Portland (CP). Este material ha sido popular debido a la disponibilidad de las materias primas para su elaboración, por lo que, para obtener el concreto se suelen usar materiales como: agregados pétreos, agua, CP y en algunas ocasiones aditivos. Tan solo en la construcción de vivienda se emplea alrededor del 50% del CP producido en México (Fry, 2013). La producción del CP en México pasó de 39.7 millones de toneladas al año a 44.9 millones de toneladas del 2005 al 2015 (Vásquez and Corrales, 2017).

Para fabricar el CP son molidos piedra caliza, arcilla, arena y minerales de hierro, los cuales son materias primas no renovables, y calcinados en un horno rotatorio a una temperatura de 1400 °C, obteniendo el Clinker, que al adicionarle yeso, adiciones y aditivos químicos (Neville and Brooks, 2010). La fabricación del CP suele ser muy contaminante, al emitirse alrededor de 90% de los gases de efecto invernadero respecto de todo el proceso de elaboración del concreto hidráulico debido a la cantidad de energéticos que se emplean, como carbón, aceite nuevo o reciclado, gas natural o neumáticos (Miller et al., 2016a). Es posible usar otros materiales alternativos como sustitución parcial del CP (Gartner and Sui, 2017), como la Pumicita (Hossain, 2004; Shi, 2001), en la que debe aplicar una activación mecánica (Bernotat and Schönert, 1998,36) y química (Shi and Day, 2000) para habilitarlo como un material cementante.

En el caso del concreto utilizado en las vías terrestres, éste debe cumplir con criterios de diseño óptimos como es la resistencia a la compresión, flexión (o módulo de ruptura) o tensión por compresión diametral, para resistir y distribuir las cargas debidas al paso de los vehículos. El objetivo de este trabajo fue evaluar y analizar el desempeño mecánico de especímenes fabricados con pumicita en diferentes porcentajes de sustitución de CP, activados mecánica y químicamente, para su posible uso las vías terrestres.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

2.1 Materiales empleados.

El método empleado para el diseño de la mezcla fue el de la American Concrete Institute ACI 211.1(ACI, 1991); fijando el contenido de cementante en 500 kg/m³; relación agua-cemento (a/c) de 0.4; resistencia a la compresión simple esperada de 350 kg/cm² a 28 días de curado. El agregado grueso fue caliza de trituración primaria, tamaño máximo nominal de 19 mm, adsorción de 0.7%, densidad relativa seca en el horno de 2.64 y peso volumétrico varillado de 1584.49 kg/m³. El agregado fino fue caliza de trituración secundaria, densidad relativa seca en el horno de 2.48, absorción de 3.1%, módulo de finura de 3.08 y peso volumétrico varillado de 1779.48 kg/m³ (NMX-C-111-ONNCCE-2014). La pumicita tuvo una densidad relativa de 2.53, de la región de Perote, Ver., secada en un horno a 100°C por 24 horas, después pasó por un tratamiento de activación mecánica en un molino de bolas en lotes de 10 kg por una hora y dieciséis minutos a 56 revoluciones por minuto hasta obtener el área superficial requerida (600 m²/kg).

2.2 Diseño de las Mezclas

Los porcentajes de sustitución de CP por P van del 30 al 70% variando de 10 en 10%, y el porcentaje de activante va del 2 al 10 % variando de 2 en 2, por lo que para el diseño de experimento se empleó el diseño central compuesto, del método experimental de superficie de respuesta para diseñar las mezclas a estudiar. En la tabla 2 se observan los factores y niveles empleados en el diseño experimental y en la figura 1 se observa el diseño central compuesto con los datos proporcionados. En la tabla 3, se muestra las proporciones de las mezclas obtenidas por el diseño de experimento.

Tabla 2. Factores y niveles empleados en el diseño experimental.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
%Pumicita (P)*	3	4	5	6	7
%Activantes (A)**	2	4	6	8	10

*los números 3, 4, ..., 7 equivalen a 30, 40, ..., 70.

**Na₂SO₄-Ca(OH)₂, en relación 1:1.

Figura 1. Diseño central compuesto de mezclas a estudiar.

Tabla 3. Mezclas diseñadas.

%Pumicita	% CP*	%Activantes	Nomenclatura
3	7	6	3P7CP6A
4	6	4	4P6CP4A
4	6	8	4P6CP8A
5	5	2	5P5CP2A
5	5	6	5P5CP6A
5	5	10	5P5CP10A
6	4	4	6P4CP4A
6	4	8	6P4CP8A
7	3	6	7P3CP6A
0	100	0	CONTROL

En la tabla 4 se presenta la relación de probetas que se fabricaron por cada mezcla para ser ensayados en diferentes días de curado, acorde a normatividad (NMX-C-159-ONNCCE-2016). Los activantes se utilizaron con el propósito de dar un tratamiento de activación química a la pumicita.

Tabla 4. Relación de probetas fabricadas por cada mezcla propuesta.

Tipo de espécimen	Tipo de ensayo	Edad de ensayo	No. de especímenes
Viga de 15x15x50 cm	Flexión	28 días	3
Cilindro de Ø 7.5x15 cm	Compresión	7, 14, 28 días	9 (por cada edad de ensayo)
Cilindro de Ø 7.5x15 cm	Tracción indirecta	7, 14, 28 días	9 (por cada edad de ensayo)

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Temperatura del concreto en estado fresco

En la Figura 2 se presentan las temperaturas registradas de las mezclas de concreto en estado fresco fabricadas acorde a normativa (NMX-C-435-ONNCCE-2010). La temperatura en estado fresco de la mezcla de CONTROL fue de 25°C, mientras que las temperaturas registradas en las mezclas con diferentes combinaciones de P, CP y A variaron entre 22 y 27°C (Mena, 1994). Se observó una relación directamente proporcional en el aumento de la temperatura con 4P6CP y 4A, y 4P6CP con 8A, al registrar temperaturas de 22.2°C y 24.6°C respectivamente, que no rebasaron la temperatura de la mezcla CONTROL.

Mientras que, las mezcla con un incremento a 5P, la disminución a 5CP y el incremento del %A, mostraron efectos ambivalentes entre sus temperaturas respecto a las fabricadas con 4P6CP. Con 5P5CP y 2A la temperatura fue 23.6°C (menor que la CONTROL), pero en la mezcla con 5P5CP y 6A registró una temperatura superior respecto a la mezcla anterior, de 27°C, sin embargo, en la mezcla 5P5CP y 10A también registró una temperatura superior respecto a 5P5CP2A, pero menor que 5P5CP6A, de 25.7°C, además de que esta mezcla desarrolló resistencias a la tensión por compresión diametral superior a la CONTROL. Por otra parte, el incremento a 6P, la disminución a 4CP con 4A y 8A las mezclas también mostraron una relación directamente proporcional en el aumento de la temperatura, de 25.9°C y 27.6°C respectivamente. El uso de 7P3CP y 6A la mezcla registró una temperatura próxima a la mezcla CONTROL.

Figura 2. Temperaturas registradas en los concretos en estado fresco de las mezclas fabricadas.

La temperatura del concreto en estado fresco cercano o por arriba de 30°C causa aumento en la rapidez del fraguado, por lo que, la colocación y acabado del concreto se vuelve más difícil (Kosmatka, 2004). Al usar 3P y 7CP con 6A la mezcla registró una menor temperatura (21.9°C) respecto a la mezcla CONTROL, por lo que, representa una opción adecuada para fabricar estructuras masivas en la que sea requerido bajo calor de hidratación, además de que esta mezcla desarrolló resistencias mecánicas cercanas a la CONTROL.

3.2 Masa unitaria del concreto en estado fresco

El concreto hidráulico estructural de masa normal en estado fresco tiene masa unitaria entre 1900 kg/m³ y 2400 kg/m³ (NMX-C-162-ONNCCE-2014). Las mezclas de concreto fabricadas para este estudio desarrollaron masas unitarias dentro de los parámetros ya señalados, aun así, los concretos fabricados con diferentes proporciones de %P-%CP-%A mostraron ciertas variaciones, como se muestra en la

figura 3. Las mezclas 4P6CP4A y 4P6CP8A registraron mayores masas unitarias comparadas a la mezcla CONTROL, aunque no se presentó un efecto significativo al usar mayor %A, al igual que en las mezclas 5P5CP (2A, 6A y 10A). Sin embargo, se presentó un efecto desfavorable en las mezclas 6P4CP al aumentar %A respectivamente, disminuyó la masa unitaria con 8A, registrando un valor por debajo en comparación a la mezcla CONTROL.

Figura 3. Masas unitarias de los concretos en estado fresco fabricados.

Por otra parte, la mezcla con 3P7CP6A permitió desarrollar mayor masa unitaria en comparación a la mezcla CONTROL, lo que se reflejó en desarrollar resistencias mecánicas cercanas al concreto CONTROL.

3.3 Resistencia a la compresión simple del concreto en estado endurecido

Se determinaron las resistencias a la compresión simple de los concretos fabricados conforme a normativas (NMX-C-109-ONNCCE-2013 y NMX-C-083-ONNCCE-2014), obteniendo los resultados que se aprecian en la Figura 4. Aunque todas las mezclas desarrollaron resistencia a la compresión conforme transcurrió el tiempo de curado, no todas las mezclas alcanzaron el valor de diseño propuesto. Además, las diversas combinaciones de %P%CP%A en las mezclas fabricadas presentaron efectos variados en resistencia a la compresión simple.

El uso de 4P6CP con 4A y 8A las mezclas mostraron un efecto adverso al disminuir la resistencia a la compresión a 28 días de curado (del 24.85% y 31.16% respectivamente comparado con la mezcla CONTROL) y no alcanzaron las resistencias de diseño. Por otro lado, la disminución del %CP y aumentar los %P y %A de las mezclas 5P5CP2A, 5P5CP6A, 5P5CP10A, 6P4CP4A y 6P4CP8A mostraron un efecto benéfico al incrementar sus resistencias a la compresión a 28 días de curado, aunque tampoco alcanzaron las resistencias de diseño (disminuyeron sus resistencias entre 20% y 39%; y 45% y 50% respectivamente comparado con la mezcla CONTROL).

La mezcla 7P3CP6A desarrolló la menor resistencia a la compresión a 28 días de curado (disminución del 54% respectivamente comparado con la mezcla CONTROL). En 8 mezclas disminuyeron sus resistencias a la compresión entre el 20% y 50% respectivamente al sustituir el CP por P en más del 30% con diferentes %A. Solo la mezcla con 3P7CP y 6A mostró un efecto favorable al desarrollar resistencia a la compresión próxima a la mezcla CONTROL a los 28 días de curado (sólo mostró una disminución de resistencia del 2.30% comparado con la mezcla CONTROL).

Figura 4. Resistencias a la compresión simple obtenida de los concretos fabricados.

3.4 Módulo de ruptura del concreto en estado endurecido

Se determinaron los módulos de ruptura de las vigas de concreto que se fabricaron para esta investigación acorde a normativa (NMX-C-191-ONNCCE-2015), como se aprecia en la Figura 5. También se observaron efectos diversos las combinaciones de %P%CP%A en las mezclas de concreto fabricadas. Para el caso de las mezclas 4P6CP4A, 4P6CP8A y 6P4CP4A, 6P4CP8A la combinación del %P%CP%A no mostró un efecto significativo entre sí, pero denotaron una disminución del módulo de ruptura entre el 6% y 8%; al 20% respectivamente comparadas a la mezcla CONTROL.

Contrariamente, en las mezclas 5P5CP(2A,6A,10A) sí se observó un efecto favorable en el incremento de %A, de tener una pérdida de resistencia del 21% y 10% respectivamente en relación a la mezcla CONTROL, al mostrar un incremento de resistencia por arriba de la mezcla CONTROL, del 13.71%. Efecto similar se presentó en la mezcla 3P7CP6A al mostrar incremento del 8.32% por arriba de la mezcla CONTROL.

3.5 Resistencia a tensión por compresión diametral del concreto en estado endurecido

Se determinaron las resistencias a la tensión por compresión diametral de los concretos fabricados conforme a normativas (NMX-C-163-1997-ONNCCE), obteniendo los resultados que se aprecian en la Figura 6. En todas las mezclas desarrollaron resistencia a tensión por compresión diametral conforme transcurrió el tiempo de curado. Se observaron efectos diversos las combinaciones de %P%CP%A en las mezclas de concreto fabricadas. En las mezclas 4P6CP4A, 4P6CP8A y 6P4CP4A, 6P4CP8A la combinación del %P%CP%A no mostró un efecto significativo entre sí, aunque mostraron una disminución del entre el 12.5% y 14%; 36.6% y 31.5% respectivamente comparadas a la mezcla CONTROL a los 28 días de curado.

Figura 5. Determinación de los módulos de ruptura de los concretos fabricados en este trabajo.

Figura 6. Determinación de la resistencia a tensión por compresión diametral de los concretos fabricados en este trabajo.

Por otro lado, las mezclas de 5P5CP con 2A y 6A tampoco mostraron un efecto significativo al incrementar el activante, aunque sí tuvieron una disminución de resistencia promedio del 20% respecto a la mezcla CONTROL a 28 días de curado. Pero con 5P5CP y 10A mostró un ligero incremento de resistencia, aunque también presentó una disminución de resistencia del 12.33% respecto a la mezcla CONTROL a 28 días de curado. Solo la mezcla con 3P7CP y 6A si presentó un efecto favorable al desarrollar resistencia prácticamente equivalente a la mezcla CONTROL.

3.6 Micrografías de los concreto en estado endurecido

Se obtuvieron las micrografías de cuatro mezclas mediante microscopía electrónica de barrido para visualizar y analizar sus morfologías. Analizar los elementos formados en los concretos fue posible mediante la interpretación de contrastes o escalas de grises, debido a que, los materiales que tienen mayor número atómico se observan más brillantes (Scrivener et al., 1986; Zhao and Darwin, 1992; Escalante-Garcia and Sharp, 2004-117). Se examinaron las mezclas CONTROL, 3P7CP6A, 5P5CP10A y 7P3CP6A a 28 días de curado. En la Figura 7 se muestra la micrografía de la mezcla CONTROL, que

desarrolló resistencias mecánicas conforme a lo diseñado, permitiendo identificar los productos de reacción desarrollados al usar un CP en su fabricación.

Figura 7. Micrografía de la mezcla CONTROL, C = grano de CP no hidratado, IP = producto interno, OP = producto externo, Po = poros.

En esta mezcla se observó en orden descendente de brillo las fases presentes. Las áreas blancas son granos de cemento sin hidratar o anhidro (C), le circundan productos de cemento parcialmente hidratados **IP** (Taylor, 118), identificado como anillos de color gris claro. La formación de la matriz de productos de reacción hidratados o producto externo **OP** (Taylor, 118) que son los productos que se encontraban en el espacio donde estaba lleno de agua, en tonos gris oscuro; en tonos negro se ven los poros **Po**. Se observó que la mayor parte del cemento se hidrató formando la matriz de reacción, teniendo una buena adherencia con los agregados pétreos, así como algunos granos de cemento en proceso de hidratación.

En la Figura 8 se muestra la micrografía de la mezcla 3P7CP6A, que desarrolló resistencias mecánicas muy próximas a la CONTROL. Además de los productos y características observados como en la mezcla antes mencionada, en ésta se aprecian en tono más brillante partículas de **P** que no se hidrataron adecuadamente. Conforme se incrementó el contenido de %P y %A, y la disminución de %CP como en las mezclas 5P5CP10A y 7P3CP6A se observaron más áreas de **P** sin hidratar, como se muestran en las Figuras 9 y 10 respectivamente.

Figura 8. Micrografía de la mezcla 3P7CP6A, C = grano de CP no hidratado, P = pumicita, IP = producto interno, OP = producto externo, Po = poros.

Figura 9. Micrografía de la mezcla 5P5CP10A, C = grano de CP no hidratado, P = pumicita, IP = producto interno, OP = producto externo, Po = poros.

Figura 10. Micrografía de la mezcla 7P3CP6A, C = grano de CP no hidratado, P = pumicita, IP = producto interno, OP = producto externo, Po = poros.

4. CONCLUSIONES

Se encontró que la temperatura obtenida en las mezclas estudiadas con sustitución de CP por P, son inferiores a 30°C, por lo que son adecuada para fabricar estructuras masivas en la que sea requerido bajo calor de hidratación.

La mezcla 3P7CP6A, alcanzó la resistencia a la compresión simple de diseño. Por lo que esta mezcla tiene los beneficios de ahorro económico y ambiental, al disminuir en 30% el consumo de CP.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que es posible emplear la pumicita en sustitución del cemento Portland, en una combinación de 30% pumicita 70% CP y 6% de activante, así como en 50% P 50% CP y 10%A, en el área de las vías terrestres, debido a que estas dos mezclas alcanzan valores de módulo de ruptura superiores a las obtenidas únicamente con CP.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del laboratorio de cementos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo, en esta investigación, por facilitar el uso de sus equipos e instalaciones.

6. REFERENCIAS

ACI Committee 211 (1991) *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*, ACI 211.1-91, reapproved 2009, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 38 pages.

- Bernotat, S. and Schönert, K. (1998) *Size reduction*. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Vol. B2, pp. 5.1–5.39.
- Escalante-Garcia, J. I., Sharp, J. H. (2004) *The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements*, Cem. Concr. Compos. 26 pp. 967–976, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.02.036>.
- Fry, M. (2013) *Cement, carbon dioxide and the necessity narrative: A case study of Mexico*. Elsevier-Geoforum.
- Gartner, E., Sui, T. (2017) *Alternative cement clinkers*, Cem. Concr. Res., <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>.
- Hossain, Khandaker M. Anwar. (2004) *Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete*. Cement and concrete research, vol. 34, no 2, p. 283-291.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., Tanesi, J. (2004) “*Diseño y Control de Mezclas de Concreto*”. Primera Edición, Portland Cement Association, pp. 143.
- Mena Ferrer, M. (1994) “*Manual de tecnología del concreto*”. Sección1. Instituto de Ingeniería, Comisión Federal de Electricidad, México. Pp. 20.
- Miller, S. A., Horvath, A., Monteito, P. J. M. (2016a), *Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%*. Environ. Res. Lett. 11, 074029.
- Neville, A. M., Brooks, J. J. (2010), “*Tecnología del concreto*”. Trillas, México, pp. 14-15.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2014), *NMX-C-083-ONNCCE-2014, Industria de la construcción–concreto–determinación de la resistencia a la compresión de especímenes–método de ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2013), *NMX-C-109-ONNCCE-2013, Industria de la construcción–concreto hidráulico–cabeceo de especímenes*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2014), *NMX-C-111-ONNCCE-2014, Industria de la construcción–agregados para concreto hidráulico–especificaciones y métodos de ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2016), *NMX-C-159-ONNCCE-2016, Industria de la construcción–concreto–elaboración y curado de especímenes de ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2014), *NMX-C-162-ONNCCE-2014, Industria de la construcción–concreto hidráulico–determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (1997), *NMX-C-163-1997-ONNCCE, Industria de la construcción–concreto–determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (2015), *NMX-C-191-ONNCCE-2015, Industria de la construcción–concreto–determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (1997), *NMX-C-435-ONNCCE-2010, Industria de la construcción–concreto hidráulico–determinación de la temperatura del concreto fresco*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., México.

- Scrivener, K.L., Patel, H.H., Pratt, P.L., Parrot, L.J. (1986) *Analysis of phases in cement paste using backscattered electron images, methanol absorption and thermogravimetric analysis*, in Struble LJ, Brown, PW, editors. Microstructural development during cement hydration. Mat Res Soc Symp Proc, 85, 67–76.
- Shi, C., Day, R.L. (2000) *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part I. Reaction kinetics*. Cem. Concr. Res. 30 (1), 51–58
- Shi, C. (2001) *An overview on the activation of reactivity of natural pozzolan*. Canadian Journal of Civil Engineering, 28(5), 778-786.
- Vásquez, B., Corrales, S. (2017), *Industria del cemento en México: análisis de sus determinantes*. Revista Problemas del Desarrollo, pp. 113-138.
- Zhao, H., Darwin, D. (1992) *Quantitative backscattered electron analysis of cement paste*. Cem Concr Res, 22, 696–706.