

Resistencia a la compresión y reología de cementantes ambientalmente amigables

Compressive strength and rheology of environmentally-friendly binders

Juan Manuel Lizarazo Marriaga¹ y Peter Claisse²

RESUMEN

Siendo la producción de cemento responsable de aproximadamente el 9% de la producción industrial de gases de invernadero, y en pro de generar materiales alternativos, en este artículo se presentan los resultados de una investigación encaminada a desarrollar cementantes que potencialmente representen una alternativa ambientalmente sostenible en la construcción civil. Combinaciones de escoria granulada de alto horno, escoria de acería obtenida mediante un proceso de oxígeno básico, polvo de horno de cemento y residuo de demolición de divisiones de yeso fueron usados para optimizar la resistencia a la compresión y obtener cinco mezclas de concreto con cementantes hechos parcial o totalmente con residuos industriales. Los resultados obtenidos muestran que las resistencias de las mezclas compuestas de cemento Portland y residuos industriales son adecuadas para una cantidad importante de aplicaciones en construcción civil, y aunque para las mezclas formadas completamente por residuos industriales se presentó una importante disminución en la resistencia a la compresión, los resultados obtenidos mostraron un gran potencial para determinadas aplicaciones industriales. Adicionalmente a la resistencia a la compresión, a dichas mezclas se les determinaron sus propiedades reológicas definiendo sus características de flujo y trabajabilidad.

Palabras clave: escoria granulada de alto horno, escoria básica de oxígeno, polvo del horno de cemento, yeso, reología.

ABSTRACT

Ordinary Portland cement production accounts for 9% of worldwide greenhouse gas emissions. This paper summarises the results of research aimed at developing environmentally-friendly binders which can be used as an alternative in civil construction, aimed at generating alternatives and sustainable materials. Mixes of the combination of granulated ground blast furnace slag, basic oxygen slag, cement kiln dust and plasterboard gypsum were used for optimising the binders, according to their compressive strength, to obtain 5 concrete mixtures made partially or completely with industrial waste. The results showed that the compressive strength of mixtures of Portland cement and industrial waste were suitable for different civil construction applications and, although mixtures formed entirely from industrial waste had a significant decrease in their compressive strength, the results showed great potential for specific industrial applications. In addition to compressive strength, the rheological properties of these mixtures were determined for defining flow and workability characteristics.

Keywords: granulated ground blast furnace slag, basic oxygen slag, cement kiln dust, plasterboard gypsum, rheology.

Recibido: agosto 18 de 2008

Aceptado: junio 16 de 2009

Introducción

Durante el año 2002 alrededor de 2,7 millones de metros cúbicos de concreto fueron producidos a nivel mundial (Naik, 2007); de esta producción, poco más o menos del 15% en peso corresponde al cemento Portland usado y refleja el inmenso consumo de este compuesto como material de construcción. Por cada tonelada de cemento producida aproximadamente una tonelada de CO₂ es liberada a la atmósfera; además, la producción de cemento equivale aproximadamente al 9% de la producción industrial de gases de invernadero. Estas situaciones confirman el tamaño del problema ambiental que se genera en la producción del cemento Portland y que contribuye al calentamiento global que actualmente está sufriendo el planeta Tierra. De la misma forma, el consumo de concreto y de cemento ha crecido notablemente en los últimos años y se espera que siga creciendo en el futuro, por lo que exis-

ten grandes retos ambientales que hacen necesario generar materiales cementantes alternativos que garanticen un medio ambiente más amigable pero que al mismo tiempo ofrezcan las mismas características ingenieriles del cemento Portland.

Durante ya varios años se ha vuelto práctica común el uso de adiciones minerales en forma de subproductos industriales adicionales al cemento; con estos, además de reducir la problemática ambiental se pueden obtener cementantes más baratos y con mejores propiedades ingenieriles, como lo son la resistencia y la durabilidad. Entre las adiciones minerales normalmente usadas se encuentran la ceniza volante (FA) (ACI-232, 2004) obtenida como subproducto de la calcinación del carbón usado en la generación eléctrica en centrales termoeléctricas, el humo de sílice (SF) (ACI-234, 2006) obtenido como subproducto industrial en la producción del ferrosilicio y sus derivados, y la escoria de alto horno (GGBS) (ACI-233, 2003) obtenida como un subproducto de la industria siderúrgica durante la fabricación del hierro. La escoria de alto horno es

¹ Ingeniero civil. M.Sc., en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. jmlizarazom@unal.edu.co

² BA and MA, in Physics, Oxford University, United Kingdom. Ph.D., in Civil Engineering, Leeds University, United Kingdom. Professor, Construction Materials, Coventry University, United Kingdom. P.Claisse@coventry.ac.uk

un material vítreo que se denomina potencialmente hidráulico, lo que significa que reacciona con el agua para formar compuestos similares a los del cemento Portland; sin embargo, requiere de un ambiente propicio, que puede ser de tipo alcalino, como el generado cuando es mezclada con el cemento Portland, o de tipo sulfatado, como cuando es mezclada con el yeso.

En este artículo se presentan los resultados experimentales de una investigación encaminada a determinar la resistencia a la compresión y el comportamiento reológico en estado fresco de unas mezclas de concreto desarrolladas con escoria activada en ambientes alcalinos y sulfatados. Para su activación se utilizaron materiales de residuo no convencionales y que en su mayoría son considerados desperdicios industriales o son usados en aplicaciones diferentes a la de los conglomerantes hidráulicos. Además de la escoria granulada de alto horno y el cemento Portland (OPC), se usaron en esta investigación polvo del horno de cemento (Cement kiln dust - CKD), que corresponde al material fino transportado por el flujo de gas caliente dentro del horno durante la fabricación del cemento, partículas de láminas de yeso obtenidas durante la demolición de unidades habitacionales u oficinas (Plasterboard or Drywall gypsum - PG), y escoria básica obtenida a través del proceso siderúrgico necesario para purificar el acero mediante la inyección de oxígeno (Basic Oxygen Slag - BOS). Un total de cinco mezclas definitivas fueron obtenidas con los anteriores materiales a través de un proceso de optimización experimental de la resistencia a compresión.

En una primera parte del artículo se presentan algunos aspectos básicos sobre la reología del concreto en estado fresco. En una segunda parte se exponen y discuten los resultados de la optimización experimental de la resistencia a la compresión, mediante la cual se seleccionaron las mezclas definitivas. En una tercera parte se exhiben los resultados de la evaluación de las propiedades de flujo de las mezclas seleccionadas; y finalmente, se presentan algunas conclusiones de la investigación.

Reología de mezclas de concreto

La trabajabilidad de una mezcla es la propiedad más importante del concreto en estado fresco y de ella dependen en gran medida las propiedades en estado endurecido, como son la resistencia y la durabilidad. El Instituto Americano del Concreto la define como «la propiedad que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclada, colocada, consolidada y terminada una mezcla de concreto o mortero fresco» (www.concrete.org/general/home.asp). Debido a la generalidad y ambigüedad de dicha definición, desde hace más de un siglo se han propuesto diversas técnicas e instrumentos para medir la trabajabilidad del concreto, existiendo tres grandes grupos de mediciones (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos para medir la trabajabilidad del concreto

Métodos cualitativos	Métodos cuantitativos empíricos	Métodos cuantitativos fundamentales
Se basan únicamente en una descripción general, sin ninguna intención cuantitativa	Son usados como medida cuantitativa del comportamiento de una mezcla bajo unas condiciones particulares (cono de Abrahams, tiempo vebe, esfera de Kelly...)	Pretenden correlacionar algún parámetro medido con una ley o formulación física (mediciones reológicas)

Otra clasificación de los ensayos y técnicas de medición de la trabajabilidad está basada en el concepto de la curva reológica de flujo, que establece la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación de una mezcla fluida de concreto. Dependiendo

de si en el ensayo se obtienen uno o múltiples puntos dentro de esta curva, este se puede clasificar como simple o multipunto. Los métodos cualitativos y cuantitativos empíricos definen por excelencia un único punto dentro de dicha curva, mientras que los ensayos cuantitativos fundamentales permiten establecer la curva completa, con sus respectivos parámetros físicos. En la literatura técnica (ACI-238, 2008) hay reportados alrededor de 33 ensayos diferentes de un solo punto, mientras que ensayos multipunto hay reportados alrededor de 19.

La ley de viscosidad de Newton ($\tau = \eta\dot{\gamma}$) establece que para un fluido newtoniano el esfuerzo cortante aplicado (τ) en una dirección es directamente proporcional a la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$), siendo la constante de proporcionalidad igual a la viscosidad (η). De acuerdo al ACI (ACI-238, 2008), el concreto en estado fresco se comporta como un material viscoplástico. Es decir, se comporta como un sólido para valores de esfuerzo cortante inferiores a un esfuerzo crítico, pero fluye como un fluido viscoso cuando este nivel de esfuerzo es sobrepasado. El esfuerzo cortante normalmente es modelado mediante la relación de Bingham ($\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$), que establece una relación lineal igual a la ley de Newton, pero supone un esfuerzo cortante mínimo inicial conocido como de fluencia (τ_0). Igualmente, el modelo plástico de Bingham puede ser clasificado como ideal o no ideal, de acuerdo a si la viscosidad es una constante, o en cambio, es función de la tasa de deformación. La figura 1 muestra las definiciones dadas anteriormente.

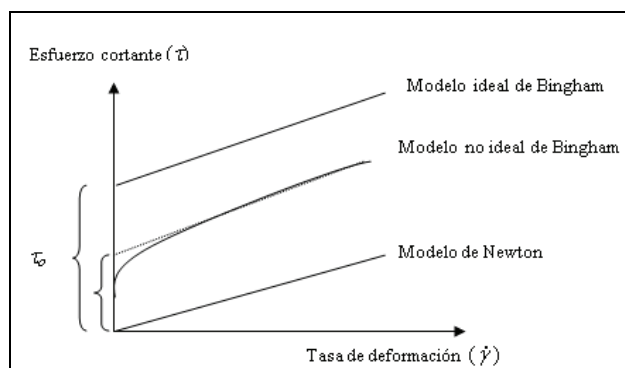


Figura 1. Modelos reológicos

Tecnológicamente los instrumentos más modernos y confiables para medir las propiedades reológicas de una mezcla de concreto son los reómetros rotacionales, estos aplican una fuerza cortante a una muestra fluida de concreto mediante diferentes niveles de esfuerzo. Mediante la medición del torque y la velocidad rotacional, propiedades físicas como el esfuerzo de fluencia (τ_0) y la viscosidad (η) son determinadas. Existen reportados 16 reómetros rotacionales, todos con distintas características, pero con un mismo propósito. Para la presente investigación fue usado el reómetro desarrollado por el Centro Internacional para la Investigación en Agregados, ICAR por sus siglas en inglés (Koehler, 2004). En la figura 2 se observa el instrumento utilizado en la presente investigación.

Optimización de la resistencia a la compresión

Como se mencionó anteriormente, en esta investigación se usaron cantidades importantes de materiales de residuo o sub-productos industriales como cementantes. En la tabla 2 se presenta la composición química de cada uno de los materiales cementantes usa-

dos, al igual que su correspondiente pérdida al fuego (LOI) y gravedad específica (SG).

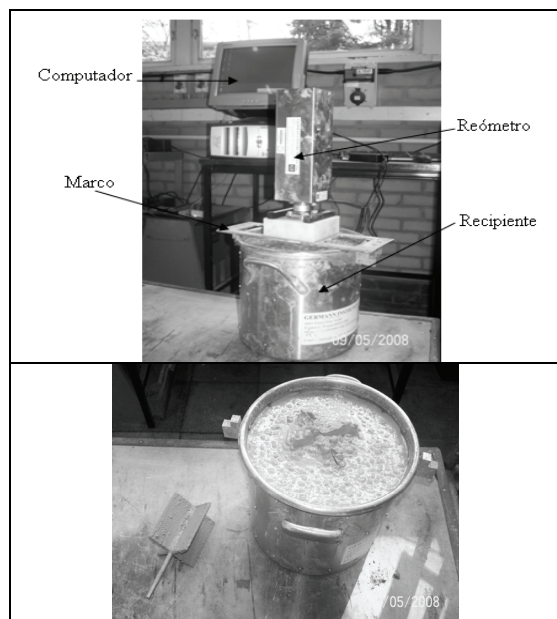


Figura 2. Reómetro ICAR usado en esta investigación

Tabla 2. Composición química de los materiales usados (* de acuerdo con el fabricante)

	Composición química [%]												SG
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI	
Cementante	19.7	---	4.9	2.4	--	2.1	63.3	0.2	0.6	---	2.7	2.7	3.11
OPC*	34.5	0.55	13.16	0.74	0.45	7.75	38.7	0.29	0.55	0.02	1.75	0.7	2.94
GGBS	11.45	0.37	2.32	27.32	3.65	9.32	37.44	0.03	0.01	1.26	0.28	3.12	3.49
BOS	12.86	0.12	3.50	2.12	0.02	2.46	58.28	0.29	1.71	0.06	6.75	10.23	2.73
CKD	2.43	0.03	0.81	0.36	0.0	0.4	37.3	0.03	0.24	0.02	53.07	4.09	2.49
PG													

Apartir de los cementantes utilizados se optimizó experimentalmente la resistencia a la compresión. Se utilizaron mezclas de pasta sin ningún tipo de agregado y con una relación agua/cementante igual a 0,30. Una vez preparadas las mezclas se fundieron cubos de 50 mm de lado para ser ensayados a los 7 y 28 días, por cada edad se ensayaron 3 réplicas. A las 24 horas de ser fundidos los especímenes fueron desmoldados y se procedió a mantenerlos en condiciones controladas de humedad y temperatura hasta el día del ensayo. Las características y resultados más importantes para cada mezcla se muestran a continuación.

Mezcla 1 → Cemento Portland patrón (OPC): se utilizó cemento normal (ASTM tipo I) con el objeto de comparar las propiedades de los nuevos materiales cementicios desarrollados con los usados normalmente en construcción civil. La resistencia a la compresión promedio obtenida a los 7 y 28 días fue de 56 y 71,2 MPa.

Mezcla 2 → Cemento Portland + escoria granulada de alto horno (OPC – GGBS): para esta combinación binaria de materiales se fundieron probetas con incrementos en el porcentaje de escoria cada 20%. Se encontró que el óptimo a 28 días corresponde a 60% de escoria y 40% de OPC (56,3 MPa), por lo que esta combinación se seleccionó como definitiva (Figura 3).

Mezcla 3 → Cemento Portland + escoria básica de oxígeno (OPC + BOS): a diferencia de la mezcla de escoria de alto horno, en la que el valor óptimo correspondió a un máximo, para la combinación OPC + BOS se encontró que, en la medida en que

se aumenta el porcentaje de escoria básica la resistencia a la compresión disminuye, como se muestra en la figura 4. Se estableció como mezcla definitiva la combinación 30% de escoria básica y 70% de cemento Portland (53,4 MPa), siendo la disminución de resistencia respecto a la mezcla 100% OPC del 25%.

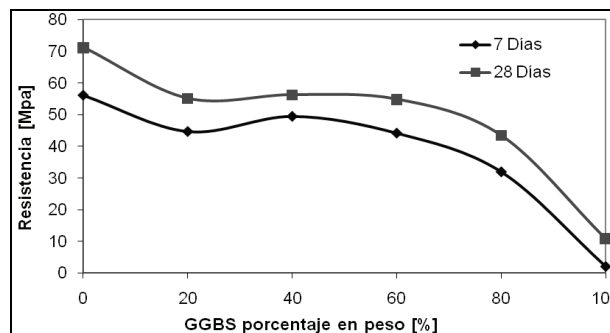


Figura 3. Combinación escoria de alto horno (GGBS) y cemento Portland (OPC)

Mezcla 4 → Cemento Portland + escoria de alto horno + escoria básica (OPC + GGBS + BOS): con el objeto de obtener las isóneas de resistencia a la compresión mostradas en la figura 5 se fundieron 18 combinaciones distintas para esta mezcla ternaria. La combinación 40% OPC, 30% GGBS y 30% BOS fue seleccionada como cementante definitivo debido a que esta proporción de materiales presentó una alta resistencia (51 MPa) y tiene un extendido uso como cementante en China, en donde sus aplicaciones van desde suelo cemento hasta concreto en masa (Shi, 2004).

Mezcla 5 → Polvo del horno de cemento + escoria de alto horno + escoria básica (CKD + GGBS + BOS): el uso del polvo del horno de cemento como material alternativo ha sido objeto frecuente de estudio (Lachemi et al., 2007), (Wang et al., 2002), debido a que su producción equivale a un considerable porcentaje del total del clinker. Su aplicación está normalmente limitada a concretos de baja resistencia o a estabilización de bases y subbases en carreteras. Siendo el CKD un subproducto directo de la producción de cemento sus propiedades alcalinas fueron usadas en esta investigación para activar la mezcla binaria de GGBS y BOS. De la misma forma, sus escasas propiedades cementicias permitieron acelerar el fraguado de las mezclas de escoria, ofreciendo un fraguado dentro de unos límites aceptables.

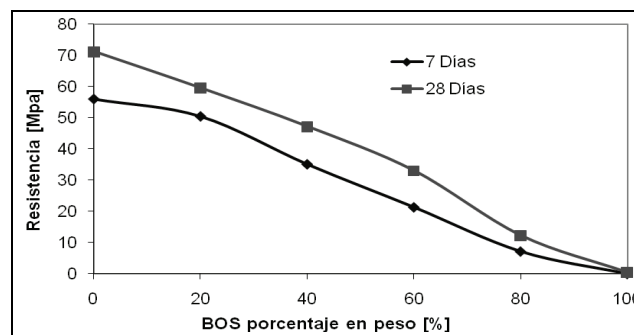


Figura 4. Combinación escoria básica (BOS) y cemento Portland (OPC)

La proporción óptima de esta mezcla ternaria se determinó mediante dos etapas. Primero, se estableció la mayor resistencia a la compresión para la combinación de GGBS y BOS. En la figura 6 (izquierda) se observa la evolución de la resistencia de acuerdo al

porcentaje de BOS, siendo la mezcla de 40% BOS + 60% GGBS la que presenta mayor resistencia a los 7 y 28 días. Una vez determinada la relación GGBS/BOS óptima se fundieron para esta combinación mezclas con 5, 10 y 15% de CKD (figura 6—derecha). Aunque la mayor resistencia obtenida correspondió a un porcentaje de 15% de CKD, se decidió utilizar como mezcla definitiva un porcentaje de 10% debido a la alta variabilidad de este material, lo que hace necesario mantener su contenido al mínimo.

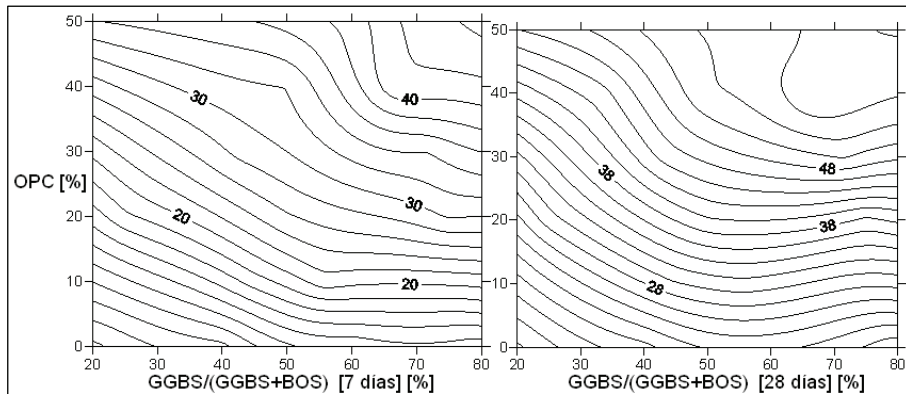


Figura 5. Resistencia a la compresión [MPa] mezcla ternaria OPC + GGBS + BOS

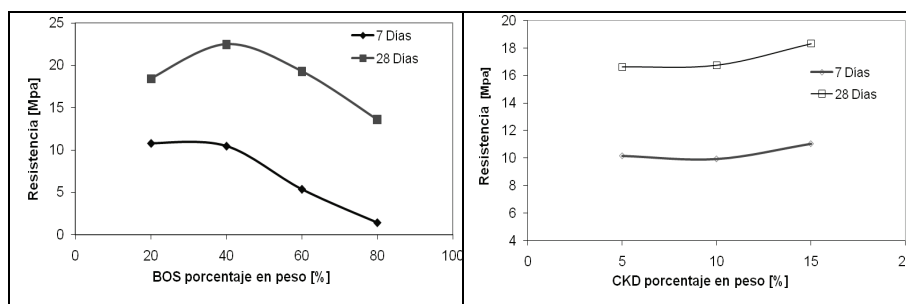


Figura 6. Mezcla GGBS + BOS (izquierda). Mezcla CKD + GGBS + BOS (derecha)

Mezcla 6 → Partículas de yeso de demolición + escoria de alto horno + escoria básica (PG + GGBS + BOS): la escoria de alto horno es un material vítreo que puede ser activado mediante sulfato de calcio. Por ejemplo, un cemento conocido como super-sulfatado (BSI, 1974) se encuentra estandarizado en el Reino Unido. Con el objeto de utilizar los residuos de yeso provenientes de la demolición de sistemas *dry-wall* o *plaster-board* para activar la escoria de alto horno, se investigó la resistencia a la compresión de variadas combinaciones de la mezcla ternaria GGBS-BOS-PG.

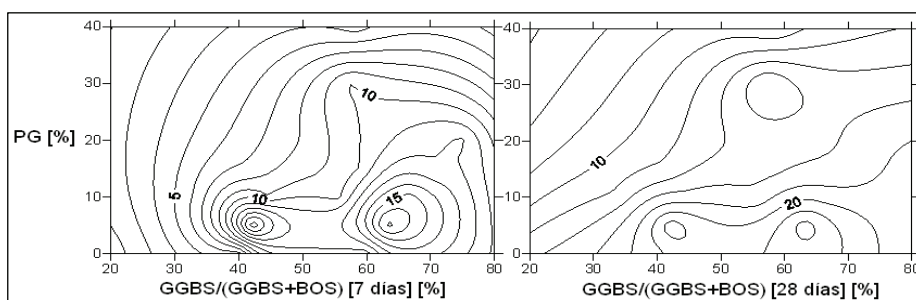


Figura 7. Resistencia mezcla ternaria PG + GGBS + BOS

Para determinar la mejor combinación de los anteriores materiales se realizaron 32 mezclas distintas. Al igual que en la mezcla 4, se obtuvieron las curvas de iso-respuesta para la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. En la figura 7 se observan los resulta-

dos obtenidos, de donde se seleccionó la mezcla 5% PG, 60% GGBS, 35% BOS, como definitiva, con una resistencia a la compresión de 24 MPa.

Reología de mezclas de concreto

La determinación de las propiedades reológicas de las mezclas optimizadas se realizó sobre muestras de concreto utilizando un reómetro tipo ICAR. Para esto, los agregados

usados fueron de origen pétreo y su distribución granulométrica se muestra en la figura 8. Las densidades reales de la arena y la grava fueron medidas mediante un picnómetro de helio y sus resultados fueron 2,66 y 2,67 g/cm³ respectivamente.

El diseño de todas las mezclas se hizo para un metro cúbico de concreto a partir de las densidades de los materiales constituyentes, se utilizó un contenido fijo de cementante para todas las mezclas igual a 400 kg/m³ y una relación agua cementante de 0,49, es decir, una cantidad de agua libre igual a 196 litros/m³ de concreto (Tabla 2).

Una vez efectuadas las mezclas se procedió a medir las propiedades reológicas dentro de los 10 minutos siguientes, adicionalmente se determinó el asentamiento mediante el cono de Abrams como medida de comparación. La figura 9 (izquierda) muestra las curvas de flujo medidas experimentalmente (torque-revoluciones por segundo) para las mezclas desarrolladas. Las diferencias observadas se atribuyen directamente al material cementante usado,

pues en todas ellas se utilizó el mismo agregado y la misma cantidad de agua libre. Igualmente, el proceso de mezclado se llevó a cabo de manera mecánica y se garantizaron para todas las mezclas las mismas condiciones.

El equipo usado determinó el torque para valores de deformación predeterminados y sobre los puntos obtenidos se aplicó una regresión de mínimos cuadrados para obtener la mejor correlación lineal. Para todos los casos el coeficiente de determinación R² fue superior a 0,98. Los resultados de asentamiento medidos con el cono de Abrams se exponen en la parte derecha de la figura 9 y se observa que el asentamiento estuvo en un rango entre 19 y 24 cm para todas las mezclas. Tal como ha sido anotado por otros investigadores, no se encontró una buena correlación entre el asentamiento y los parámetros que representan la curva de flujo, bien sea el torque para una velocidad de rotación de 0 rev/s o la pendiente de la curva.

Mediante un proceso de calibración, se determinaron los parámetros físicos del flujo a través de los parámetros relativos del ensayo. El esfuerzo de fluencia en Pa y la viscosidad en Pa*s obtenidos se muestran en la figura 10. Se observa que la viscosidad plástica se ve fuertemente influenciada por la presencia de la mezcla binaria GGBS-BOS y que la presencia de OPC genera una disminución en esta propie-

dad. El esfuerzo de fluencia fue para todas las mezclas, con excepción de la combinación OPC-GGBS, menor que la muestra de OPC. Se observa que la utilización de BOS produce beneficios en las propiedades reológicas, generando mezclas con características similares a la de una suspensión poco segregable, y produciendo además bajos valores de esfuerzo de fluencia y viscosidad. Sin embargo, se detectaron problemas relacionados con el sangrado y la exudación relativos a este material.

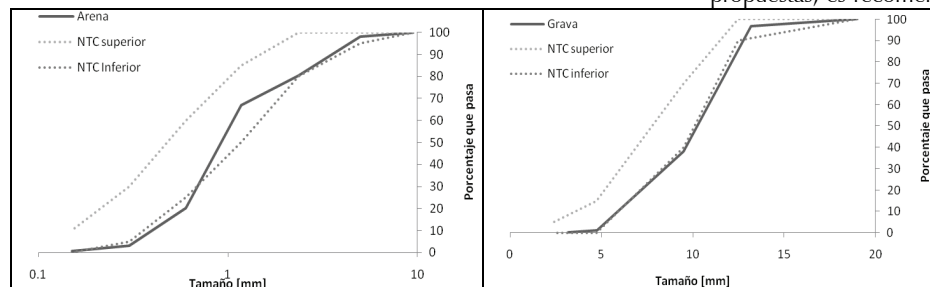


Figura 8. Granulometría agregados pétreos usados

Tabla 2. Diseño de mezclas de concreto

Proporciones	Cementante [kg/m ³]						Litros Agua	[kg/m ³ arena]	[kg/m ³ grava]
	OPC	GGBS	BOS	BPD	PG	Total			
100% OPC	400	0.0	0.0	0.0	0.0	400	196	752	919
40% OPC + 60% GGBS	160	240	0.0	0.0	0.0	400	196	762	931
70% OPC + 30% BOS	280	0.0	120	0.0	0.0	400	196	749	915
40% OPC + 30% GGBS + 30% BOS	160	120	120	0.0	0.0	400	196	754	922
10% BPD + 54% GGBS + 36% BOS	0.0	216	144	40.0	0.0	400	196	755	923
5% PG + 60% GGBS + 35% BOS	0.0	240	140	0.0	20.0	400	196	757	925

Si bien la resistencia a la compresión fue evaluada para las mezclas propuestas, es recomendable extender los tiempos de ensayo a

edades tardías y, de la misma forma, evaluar su durabilidad.

La inclusión de BOS produce una mejora en la trabajabilidad, disminuye el esfuerzo de fluencia y aumenta su viscosidad de la mezcla; sin embargo, aumenta la exudación de las mezclas.

El asentamiento mediante el cono de Abrams, a pesar de ser el método más

utilizado a nivel mundial, no presenta una buena correlación con las propiedades físicas del flujo de las mezclas ensayadas.

Bibliografía

ACI-232 (2004) 232.2R-03: Use of Fly Ash in Concrete., ACI - American Concrete Institute.

ACI-233 (2003) 233R-03: Slag Cement in Concrete and Mortar., ACI - American Concrete Institute.

ACI-234 (2006) 234R-06: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete., ACI - American Concrete Institute.

ACI-238 (2008) 238.1R-08 Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete., ACI - American Concrete Institute.

BSI (1974) Specification for supersulphated cement BS 4248., British Standards Institution

Koehler, E. P., Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete., Austin, TX, University of Texas at Austin, 2004.

L'Chemi, M., Hossain, K.M. A., Shehata, M. T., W Characteristics of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust Canadian Journal of Civil Engineering, 34, 11, 2007, pp. 485-495.

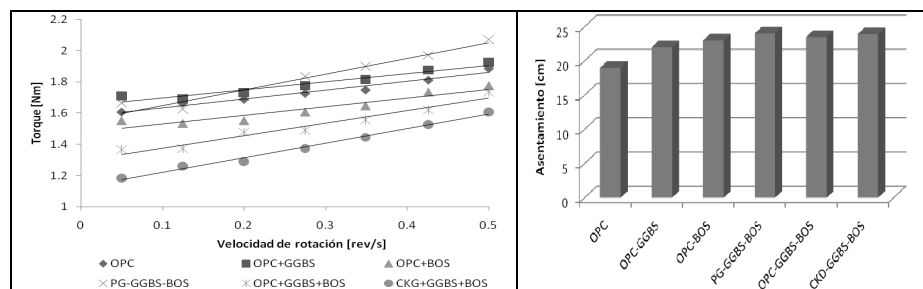


Figura 9. Curva de flujo y asentamiento para las mezclas desarrolladas

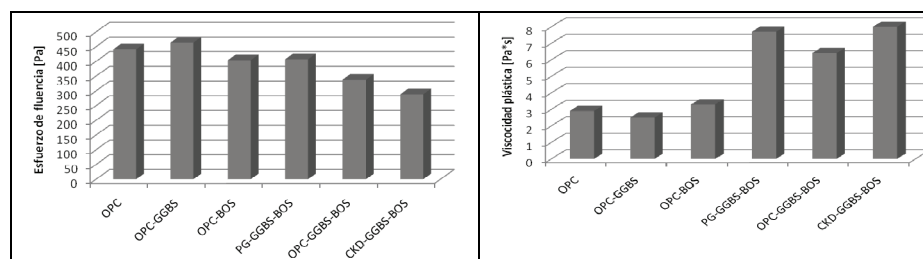


Figura 10. Esfuerzo de fluencia y viscosidad

Conclusiones

Se desarrollaron cinco cementantes alternativos con bajos contenidos de cemento Portland y con cantidades importantes de subproductos y residuos industriales. Para estos cementantes se obtuvieron adecuados valores de resistencia a la compresión e interesantes propiedades reológicas.

Naik, T. R. Sustainability of the cement and concrete industries. IN Y.M. Chun, P. C., T.R. Naik, E. Ganjian (Ed. Proc. Int. Conf: Sustainable construction materials and technologies. Coventry., Taylor and Francis, London, 2007.

Shi, C., Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties., J. Mat. in Civ. Engrg, 16, 2004, pp. 230-236.

Wang, K., Konsta-Gdoutos, M. S., Shah, S. P., Hydration, Rheology, and Strength of Ordinary Portland Cement (OPC)-Cement Kiln Dust (CKD)-Slag Binders., ACI - Materials Journal, 99, 2002, pp. 173-179.