



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

EFFECTO DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA Y CENIZA VOLANTE EN LA REOLOGÍA DE PASTAS DE CEMENTO

V. Jiménez-Quero^{1,2}, P. Montes-García¹, G. Chacón-Nava², F. León-Martínez¹

¹Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN Oaxaca). Calle Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán. Oaxaca. C.P. 71230. Oaxaca, Oaxaca.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C. Unidad Chihuahua, Miguel de Cervantes 120, C.P. 31109. Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua.

RESUMEN

Se investigó el efecto de la ceniza de bagazo de caña (CBC) y ceniza volante (CV) en las propiedades reológicas de pastas de cemento simples, binarias y ternarias y se compararon con pruebas de revenimiento con un mini-cono. En pastas binarias se observó una relación inversa entre el esfuerzo de fluencia y la concentración de CV. La forma y tamaño de las partículas de CBC produjeron pastas binarias más viscosas que las mezclas sin CBC. Al incrementar la concentración de CBC, el esfuerzo de fluencia incrementó linealmente. En los sistemas ternarios el uso de 20% de CV combinado con 10% y 20% de CBC fue benéfico porque se produjeron esfuerzos de fluencia más bajos que aquellos presentados en los sistemas binarios. Los resultados obtenidos con las pruebas del mini-cono se correlacionan bien con las mediciones reológicas.

Palabras claves: Esfuerzo de fluencia, fluidez, extensibilidad, superplastificante, sistema de medición de bolas.

ABSTRACT

The effect of sugar cane bagasse ash (SCBA) and fly ash (FA) on the rheological properties of single ingredient, binary and ternary cement pastes was investigated. The rheological tests and mini-slump cone tests were compared. The results indicated that for the binary pastes, there is an inverse relationship between the yield stress and FA concentration. The shape and size of the particles of SCBA produced more viscous and plastic binary pastes than mixes without SCBA. When the SCBA concentration was increased, the yield stress linearly increased. In the ternary systems, the use of 20% of FA combined with 10 y 20% of SCBA was beneficial producing lower yield stresses than those presented in the binary system. The results obtained with the mini-slump cone tests are in agreement with the rheological measurements.

Key words: yield stress, fluidity, extensibility, superplastizer, ball measuring system

INTRODUCCIÓN

La ceniza volante (CV) es una adición mineral industrial que incrementa la fluidez en estado fresco de materiales basados en cemento¹. Aunque los beneficios de incorporar ceniza volante a los materiales cementantes son evidentes, la ceniza volante no está fácilmente disponible en México y cuando lo está, tiende a ser muy cara. La ceniza de bagazo de caña (CBC) es un desecho producido en cantidades significantes por la industria azucarera. Pocos estudios se han llevado a cabo mostrando que la CBC presenta adecuado comportamiento en mezclas de materiales cementantes^{2,3}.

Cordeiro et al. (2009)⁴ encontraron que el uso de CBC en concretos de alto comportamiento como remplazo parcial de cemento portland mejora las propiedades reológicas. Los beneficios obtenidos fueron por el tratamiento de cribado que recibieron las cenizas antes de su incorporación en las mezclas de concreto. Cordeiro et al. (2012)⁵, estudiaron la influencia de CBC y ceniza de cáscara de arroz en las propiedades de concretos. Las cenizas fueron producidas usando un molino vibratorio, y se llevaron a cabo experimentos reológicos en un reómetro con plato paralelo BTRHEOM concluyendo que la CBC causa un ligero incremento en el esfuerzo de fluencia y una pequeña reducción en la viscosidad plástica de ambos concretos.

Debido a la escasez de reportes sobre los efectos de la CBC en las propiedades reológicas de materiales basados en cemento y considerando la capacidad de producción de CBC en México⁶, esta investigación se desarrolló para evaluar el efecto de la CBC y CV en las propiedades reológicas de pastas de cemento. Adicionalmente fueron llevadas a cabo pruebas para determinar la factibilidad de evaluar las características reológicas de pastas de cemento a partir de pruebas empíricas, tal como el minicono de revenimiento.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

La CBC usada es un producto de desecho de la industria azucarera obtenida del ingenio Constanca, localizado en Tezonapa, Veracruz, México. La CBC fue colectada directamente del tiradero a cielo abierto y sólo fue cribada por el tamiz No. 200 (75 μm) por 4 minutos. La CV usada es un material de construcción comercialmente disponible en el mercado (Admix Tech). Las densidades de ambas cenizas fueron 2.24 y 2.27 g/cm^3 , respectivamente. El cemento usado fue cemento de grado comercial portland compuesto CPC30R (CP) el cual cumple con la norma NMX-C-41-ONNCCE⁷, con una densidad de 2.94 g/cm^3 . La composición química de las adiciones minerales y el CP se muestran en la Tabla 1. La distribución de tamaños de partículas fue determinada en muestras de polvos usando un difractómetro de rayos láser equipado con un alimentador de polvo seco, y microfografías de las muestras en polvo utilizando un microscopio electrónico de barrido de alto vacío.

Diseño, preparación de mezclas y equipo utilizado

Las pastas de cemento fueron: sistema simple (CP), binario (CP-CV y CP-CBC) y ternario (CP-CV-CBC). La relación agua/materiales cementantes fue de 0.50. El 80% de agua de mezclado fue colocada en el tazón de una mezcladora, entonces la mezcla de polvos fue adicionada y se dejó en reposo por 30 s. El mezclado se inició a una velocidad lenta 14.66 ± 0.52 rad/seg por 2 minutos. El mezclado se detuvo después 30 s y se adicionó el agua restante de mezclado con un

superplastificante base policarboxilatos. Finalmente, el mezclado fue reiniciado a velocidad media (29.84 ± 1.05 rad/s) y los ingredientes se mezclaron por 3 minutos más. Para realizar las pruebas se utilizó un reómetro con el sistema de medición de bolas⁸, y para evaluar el área relativa de flujo se utilizó un mini-cono⁹.

Tabla 1.- Composición química de los materiales usados en el proyecto (wt.%)

Oxido base	CP ¹	CBC ²	CV ³
SiO ₂	15.96	56.37	61.10
Al ₂ O ₃	4.46	14.61	20.58
Fe ₂ O ₃	2.24	5.04	2.78
CaO	62.75	2.36	4.83
MgO	1.49	1.43	1.20
Na ₂ O	0.42	1.57	1.28
K ₂ O	0.57	3.29	1.30
Fe	1.63	4.38	3.59
TiO ₂	0.15	0.96	0.72
P ₂ O ₅	0.33	0.85	0.22
MnO	0.09	0.18	0.05
LOI	10.03	10.53	3.69

¹ Cemento Portland Compuesto (CP)

² Ceniza de Bagazo de Caña (CBC)

³ Ceniza Volante (CV)

Procedimiento

Pruebas de reología

Se obtuvieron curvas de ida y regreso en velocidad de corte controlada en un rango de 0.001 a 50 s⁻¹ con 33 puntos para cada curva. La temperatura de la muestra se mantuvo en 23±1 °C por medio de un baño de agua. Las curvas de flujo obtenidas mostraron una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte; por lo tanto se utilizó el modelo general de Herschel-Bulkley (Ecuación 1), que es apropiado para describir el comportamiento reológico de pastas de cemento y morteros y ha sido comúnmente usado para describir el comportamiento viscoelástico de fluidos¹⁰. El modelo puede ser representado como una combinación de los modelos de Bingham y el modelo de potencia.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde: τ es esfuerzo cortante (Pa), τ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa) K es el coeficiente de consistencia (Pa.sⁿ), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de corte (s⁻¹) y n es el índice de comportamiento de flujo (adimensional).

Pruebas con el mini-cono

El método de mini-cono se empleó para evaluar el área relativa de flujo de pastas de cemento combinadas con adiciones minerales. El área relativa de flujo (Γ_m) se calculó usando la ecuación propuesta por Okamura y Ouchi¹¹ (Ecuación 2):

$$\Gamma_m = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (2)$$

Donde d_0 es el diámetro del molde, d_1 y d_2 son los diámetros obtenidos de la prueba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química, morfología y áreas superficiales de las adiciones minerales.

La CV tuvo una suma de óxidos mayores de 85.74%, un contenido de CaO de 5.47% y pérdidas por ignición (LOI) de 3.69%, por lo cual se clasifica como una puzolana clase F; para la CBC fueron de 76.02%, 2.36% y 10.53%, respectivamente. Aunque el porcentaje de LOI de la CBC fue alto se decidió utilizarla en el estudio.

La Figura 1 muestra micrografías de partículas de CBC siendo elongadas y angulares, mientras que las de CV son esféricas, y las de CP angulares. El valor del área superficial de la CV fue 60% menor que CP; sin embargo, la CBC presentó la menor área superficial.

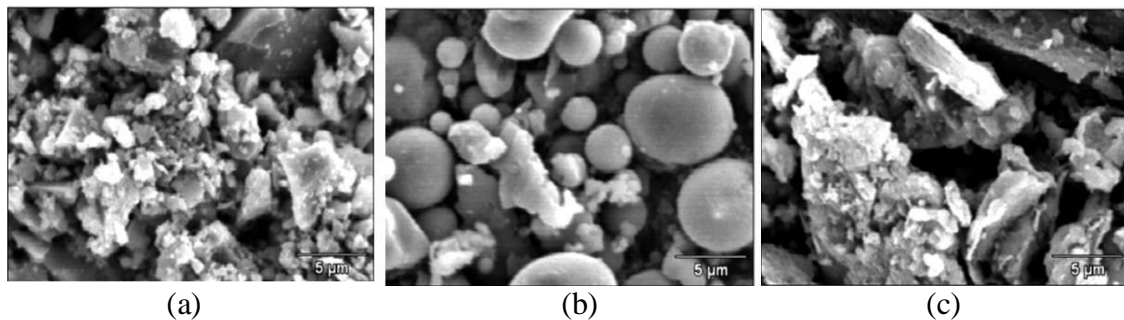


Figura 1.- Micrografías: a) CP, b) CV y c) CBC

Reología de pastas de cemento

Sistemas simples

Los parámetros de Herschel-Bulkley se muestran en la Tabla 2. El esfuerzo de fluencia (τ_0) disminuye drásticamente de 69 a 0.15 Pa. Esto ocurre porque el superplastificante tiene una larga cadena hidrofílica que garantiza un tipo de repulsión estérica aún después de que la molécula del polímero es cubierta por los productos de la hidratación inicial¹². El coeficiente de consistencia (K) disminuye de 5.4 a 0.02 Pa.sⁿ. En el modelo de Herschel-Bulkley el valor de K depende del valor numérico de n , por lo tanto, los valores de K no deben ser comparados cuando los valores de n difieren significativamente. El valor de K puede ser interpretado como el valor de la viscosidad aparente en la velocidad de corte unitaria y por lo tanto, dependerá de la unidad de tiempo empleada¹³. La muestra con 12 ml/kg de cemento de SP se considera como el punto de saturación (Figura 2). Es por ello que la pasta P-3SP fue considerada como control.

Sistemas binarios (P-CV y P-CBC)

En la Tabla 2 se también se observa que al incrementar CV, τ_0 se reduce ligeramente y K presenta una ligera variación. Las pastas de cemento con 20 y 30% de CV mostraron un τ_0 más pequeño que la pasta de cemento (P-3SP), y el índice de Herschel-Bulkley (n) se redujo, indicando un bajo comportamiento de engrosamiento de la pasta. La Figura 3 muestra que la reducción de τ_0 entre las pastas con 20 y 30 % de CV fue de 6%; sin embargo la muestra con 20

% CV se comportó como un fluido Newtoniano, y por esta razón, se decidió usar 20% de ceniza volante para las mezclas ternarias. Las curvas con 10 y 30% de CV son muy similares a la pasta con 20% CV y las gráficas se traslapan, por lo tanto solamente se presenta la curva con 20% CV.

Para las mezclas binarias P-CBC, se encontró una relación directamente proporcional entre el esfuerzo cortante y la concentración de CBC. Al compararlas con CP-3S, τ_0 fue 6.32 veces más grande en la pasta conteniendo 30% de CBC. Este comportamiento negativo es atribuido, primero, al hecho que las partículas de CBC fueron elongadas y angulares, segundo, al hecho que la distribución del tamaño de partículas presentada fue monodispersa. El alto contenido de pérdidas por ignición LOI de la CBC (>10 %) podría ser también responsable del comportamiento reológico observado en las pastas binarias. El efecto puede ser asumido porque el alto contenido de LOI puede ser considerado como un indicativo de los altos niveles de carbón sin calcinar. Por ejemplo, Chandara et. al (2010)¹⁴, encontró que altos niveles de partículas de carbón sin quemar resultan en un incremento en el requerimiento de agua y dosificación de superplasticida (SP), porque el SP es absorbido por las partículas de carbón.

Sistema ternario (P-CV-CBC)

El τ_0 para los sistemas con 10% de CBC fue menor que el obtenido para la pasta P-3S (Tabla 2); sin embargo, con el incremento de la CBC de 10% a 20% τ_0 fue el doble. Con el incremento de CBC de 10 a 30% el esfuerzo requerido para hacer fluir la pasta fue 15 veces más grande. En la Figura 3 se observa que cuando la cantidad de CBC se incrementó, la tendencia al engrosamiento de la pasta también se intensificó. Este cambio en el comportamiento reológico pudo haber sido producido por una alta concentración de partículas de CBC en la suspensión ya que pueden absorber más agua y más SP. Los sistemas ternarios toman las ventajas de la CV y producen un bajo valor de τ_0 en comparación con las mezclas binarias con CBC. Este comportamiento ocurre porque la forma y el tamaño de CV juegan un importante rol de lubricante en la reducción de la tendencia de la CBC a unirse.

Tabla 2.- Proporcionamiento de las pastas de cemento (wt. %), parámetros calculados de Herschel-Bulkley y área relativa de flujo

Tipo de mezcla	Nomenclatura	CP	CBC	CV	SP* (mL/kg d cemento)	Parámetros de Herschel-Bulkley			R ²	Área Relativa de flujo (mm ²)
						τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n		
Simple	P-0	100	-	-	-	69.007	5.476	0.627	0.995	1.64
	P-1SP	100	-	-	6	22.360	0.023	1.780	0.983	4.91
	P-2SP	100	-	-	9	3.402	0.039	1.561	0.996	9.70
	P-3SP	100	-	-	12	0.158	0.011	1.728	0.999	13.62
	P-4SP	100	-	-	14	0.158	0.017	1.645	0.999	17.34
Binaria	P-CV10	90	-	10	12	0.190	0.019	1.634	0.999	13.27
	P-CV20	80	-	20	12	0.150	0.025	1.556	0.996	14.88
	P-CV30	70	-	30	12	0.144	0.014	1.713	0.999	15.20
	P-CBC10	90	10	-	12	0.180	0.031	1.560	0.995	13.27
	P-CBC20	80	20	-	12	0.500	0.362	1.483	0.999	11.15
	P-CBC30	70	30	-	12	1.000	1.258	1.527	0.996	9.24
Ternaria	P-CV20-CBC10	70	10	20	12	0.100	0.048	1.516	0.997	13.55
	P-CV20-CBC20	60	20	20	12	0.192	0.187	1.656	0.999	11.84
	P-CV20-CBC30	50	30	20	12	1.500	0.349	1.845	0.989	10.68

* Superplastificante en mL/kg cemento

τ_0 Esfuerzo de fluencia

K Coeficiente de consistencia

n Índice de Herschel/Bulkley

r² Coeficiente de Correlación

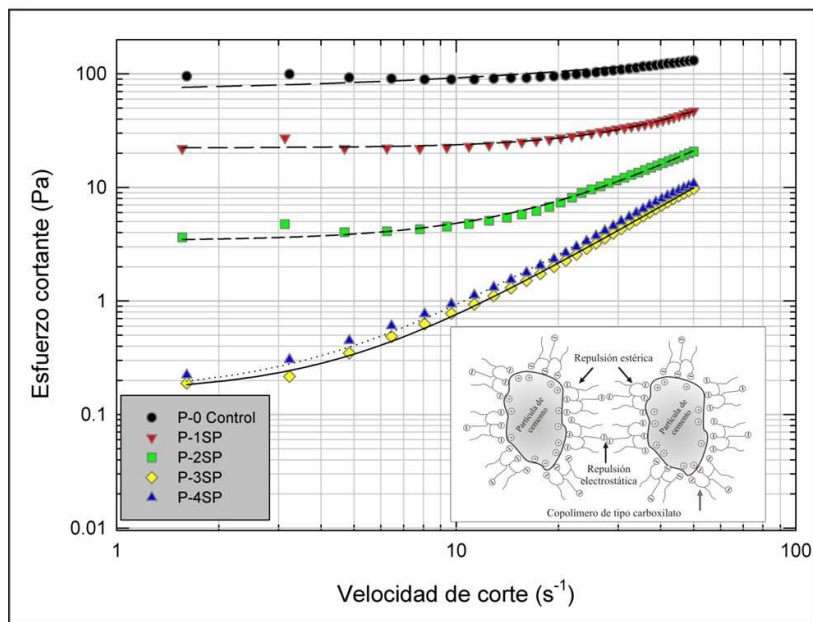


Figura 2.-Efecto del superplastificante en el esfuerzo cortante de pastas simples

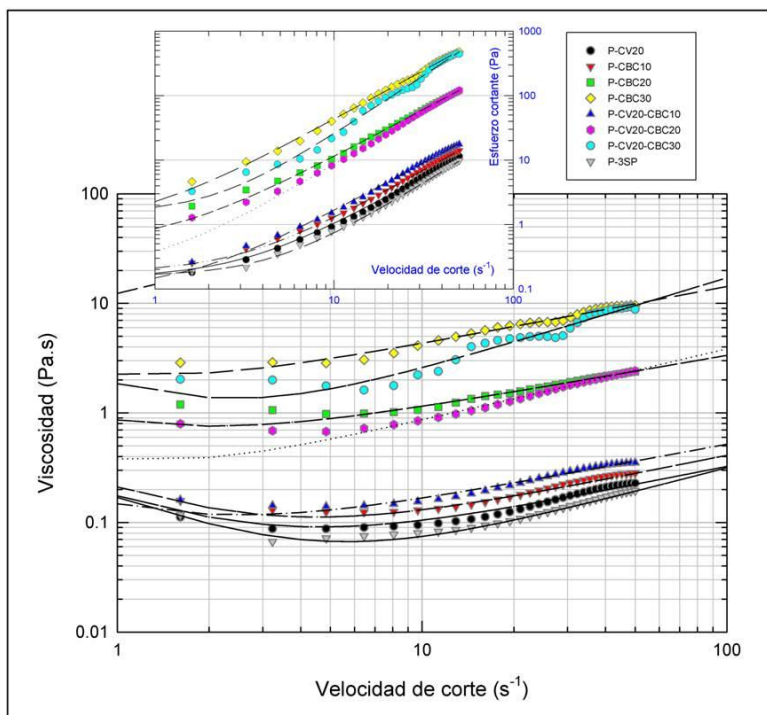


Figura 3.- Curvas de esfuerzo cortante y viscosidad de pastas de cemento binarias y ternarias

Comparación entre las pruebas reológicas y las del minicono

En los sistemas simples, la mezcla P-4S y P-3S tuvieron idénticos valores de τ_0 pero diferentes áreas relativas de flujo. Esto ocurrió porque la cantidad de SP excedió el punto de saturación, y se experimentaron efectos negativos, tales como segregación y sangrado. Como se esperaba, en los sistemas de pastas binarios conteniendo CV, cuando se adicionaron los diferentes porcentajes de

CV, el τ_0 disminuyó y se obtuvieron grandes áreas relativas de flujo. En el caso de mezclas con CBC, cuando la cantidad de CBC se incrementó, el esfuerzo de fluencia se incrementó y se obtuvieron pequeñas áreas relativas de flujo. El comportamiento reológico de las mezclas ternarias con 10% y 20% de CBC fue mejorado con la adición de 20% de CV; sin embargo, esto no sucedió en la mezcla ternaria con 30% de CBC. Esto es atribuido al hecho que un incremento del contenido de CBC incrementa el contenido de partículas de carbón y esas partículas afectan adversamente la demanda de agua y SP^{15,16}. Además, un exceso en la adición de CBC resulta en un incremento en la superficie de área específica de la ceniza y fricción entre partículas lo cual causa un incremento en la demanda de SP para alcanzar una consistencia dada. Se observa una relación inversa tentativa entre τ_0 y el área relativa de flujo, la cual muestra que altos valores de τ_0 generan bajas áreas relativas de flujo(Figura 4).

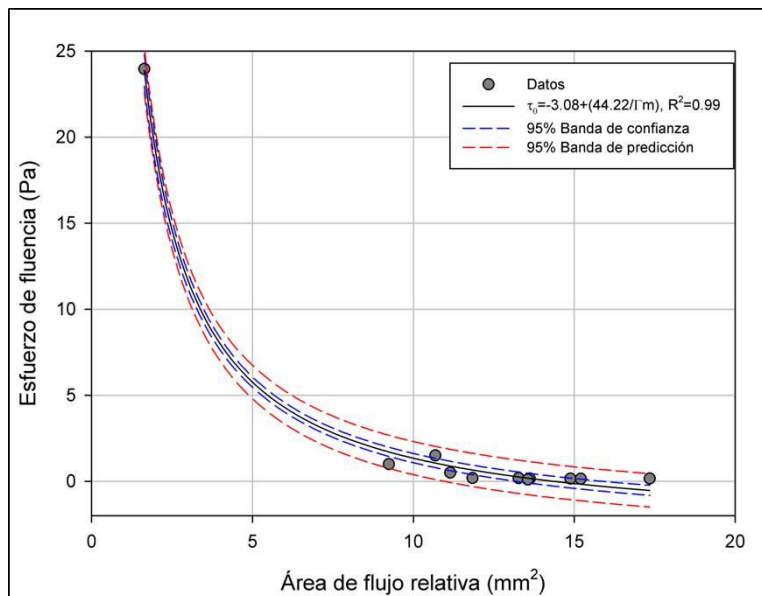


Figura 4.- Comparación entre las áreas relativas de flujo y el esfuerzo de fluencia

CONCLUSIONES

La adición de CBC produce un incremento en el esfuerzo de fluencia y viscosidad en las pastas de cemento.

La adición de CV en pastas conteniendo CBC tiene efectos benéficos en la trabajabilidad porque el esfuerzo de fluencia en las pastas se disminuye. Las pastas de cemento con 10% de CBC y 20% de CV mostraron el valor más bajo de esfuerzo de fluencia. Todas las pastas ternarias con CBC y CV presentaron esfuerzos de fluencia más bajos que las pastas binarias con sólo CBC.

Las mediciones reológicas en pastas se pueden correlacionar con los resultados de la prueba de minicono.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Instituto Politécnico Nacional y a la COFAA del IPN, por el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo. De manera especial al M. en C. Samuel Ramírez Arellano, su colaboración y apoyo.

REFERENCIAS

- [1] M. Ahmaruzzaman, “A review on the utilization of fly ash”, *Progress Energy Combust Science* 36, (2010):pp.327–363.
- [2] J.F. Martirena-Hernández, B. Middendorf, M. H. Gehrke, Budelmann, “Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction”, *Cement and Concrete Research* 28, (1998):pp.1525-1536.
- [3] E.V. Morales, E. Villar-Cociña, M. Frías, S.F Santos, H.Savastano Jr., “Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation”. *Cement and Concrete Composites* 31, (2009):pp.22-28.
- [4] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo-Filho, L.M. Tavares, E.M,R. Fairbairn, “Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete”, *Cement and Concrete Research* 39, (2009):pp.110-115.
- [5] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo-Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, “Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes”. *Construction and Building Materials* 29, (2012):pp.641-646.
- [6] www.localpower.org (March 23,2012)
- [7] NMX-C-414-ONNCCE-2004. Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba, Normas Mexicanas, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. p. 1–2 (In Spanish).
- [8] M. Schatzmann, P. Fischer, G.R. Bezzola, “Rheological behavior of fine and large particle suspensions”, *Journal Hydraulic Engineering-ASCE* 129, (2003):pp. 796–803.
- [9] D.L. Kantro, “Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste-A Miniature Slump Test”, *Cement and Concrete Aggregates* 2, (1980):pp.36-43.
- [10] A. Yahia, K.H. Khayat, “Aplicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture”, *Materials and Structure* 36, (2003):pp.402-412.
- [12] H. Okamura, M. Ouchi, “Self-compacting concrete”, *Journal Advanced Concrete Technology* 1, (2003):pp.5–15.
- [12] L. Ferrari, J. Kaufmann, F. Winnefeld, J. Plank, “Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements”, *Journal Colloid Interface Science* 347, (2010):pp.15–24.
- [13] H. Vikan, H. Justnes, F. Winnefeld, R. Figi, “Correlating cement characteristics with rheology of paste”, *Cement and Concrete Research* 37, (2007):pp.1502-1511.
- [14] C. Chandara, E. Sakai, K. Azizli, Z. Ahmad, S. Hashim, “The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer”, *Construction and Building Materials* 24, (2010):pp.1590–1593.
- [15] M. Yosuke, N. Toyoharu, “The study about effects of unburnt carbon of fly ash on packing fraction and fluidity of paste”, *Japan Cement Association Proceedings of Cement & Concrete* 57, (2003):pp.414-420.
- [16] V.S. Batra, S. Urbonaite, G.Svensson, “Characterization of unburned carbon in bagasse fly ash”, *Fuel* 87 (2008):pp.2972–2976.