

# Assessment of the maturity concept in concrete with addition of rice husk ash

## Evaluación del concepto de madurez en el hormigón con adición de cenizas de cascarilla de arroz

J. Akasaki \*, M. Moraes \*, C. Silva\*, C. Fioriti \*, M. Tashima \*

\* Universidad Estadual Paulista, San Paulo. BRASIL

Fecha de Recepción: 11/05/2016

Fecha de Aceptación: 31/10/2016

PAG 175-182

### Abstract

*Steam curing is a process used to accelerate cement hydration reactions with the purpose of enhancing the mechanical strength of concrete at early ages, since hydration reactions are temperature dependent. To evaluate the influence of temperature on the development of mechanical properties of concrete the maturity concept was used. This method estimates the development of these properties according to the temperature history of concrete along the curing process. The temperature influence is indicated through the apparent activation energy (AE) value. The higher the AE value, the higher the energy amount will be necessary to start reactions, and thus the velocity of these reactions will be affected by temperature. This work is based on an experimental study of steam-cured concrete made with 5% and 10% of rice husk ash (RHA) addition in which the development of some mechanical properties was investigated. The rice husk ash used was obtained from uncontrolled combustion of rice husk, in an open chamber, without any temperature control or burning time. The mechanical property investigated was the compressive strength. Results indicate the influence of RHA addition and its dosage on the hydration reactions of cement and the mechanical properties of steam-cured concretes.*

*Keywords: Concrete, rice husk ash, steam curing, maturity*

### Resumen

La cura termal es un proceso utilizado para acelerar las reacciones de hidratación del cemento portland con el objetivo de obtener beneficios de resistencia mecánica a edades tempranas del hormigón, puesto que la temperatura opera en la velocidad de estas reacciones. Para una mejor evaluación de la influencia que ejerce la temperatura sobre el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto, se utiliza el concepto de madurez. El método de madurez estima el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto relacionado con la historia de las temperaturas durante el proceso de curado. La influencia de la temperatura puede ser indicada por la energía de activación (EA) aparente. Cuanto mayor sea el valor de la EA, mayor será la potencia necesaria para iniciar la reacción y, por lo tanto, la velocidad de estas reacciones se verá afectada por la temperatura. Este trabajo presenta los resultados de la determinación experimental de la resistencia a la compresión del hormigón fabricado con adición de cenizas de cascarilla de arroz (CCA), producido por la combustión no controlada de la corteza, en cámara abierta, sin control de la temperatura ni del tiempo de combustión. Como propiedad mecánica, se investigó la resistencia a la compresión. Los resultados señalan la influencia de la adición de CCA y su posología en las reacciones de hidratación del cemento y las propiedades mecánicas del hormigón con cura termal.

**Palabras clave:** Hormigón, cenizas de cascarilla de arroz, cura termal, madurez

## 1. Introducción

### 1.1 Método de la madurez

El método de la madurez se creó con la intención de estimar el desarrollo de las propiedades del concreto, relacionándolas con la temperatura histórica durante el proceso de curado, con las funciones de la madurez de tiempo y temperatura (Scoes et al., 2006). En construcción civil, el método de la madurez se usa para determinar el tiempo aproximado que demora el concreto en alcanzar una determinada resistencia a la compresión "in situ", analizando la descripción de la temperatura en la que ocurre el curado y las muestras analizadas en el laboratorio tratadas con temperaturas controladas. El uso de la cura termal para el concreto se emplea principalmente para reducir el tiempo de curado de las partes cuando se requiere una alta rotación de los moldajes.

El aumento de la temperatura de curado del concreto acelera las reacciones químicas de hidratación del cemento, confiriendo una mayor resistencia inicial, reduciendo así el

tiempo de retiro de los moldajes. Sin embargo, según (Peres et al., 2007) cualquier propiedad mecánica o física del concreto relacionada con el grado de hidratación podría ser alcanzada por el método de la madurez, y no integrándola al proceso para estimar la resistencia a la compresión.

Inicialmente, el concepto de la madurez se relacionaba con la ley de ganancia de resistencia a la compresión con la madurez: "Una misma muestra de concreto con exactamente el mismo grado de madurez – medido como una función de la temperatura y del tiempo - tiene, aproximadamente, la misma resistencia que cualquiera de las combinaciones de temperatura y tiempo para alcanzar el factor de madurez"(Barbosa et al., 2005).

(Peres et al., 2007) consideraban la relación de la madurez con el grado relativo de desarrollo de la resistencia a la compresión, lo que a su vez modificó la ley de Saul de 1951: "Una misma mezcla de concreto con exactamente el mismo grado de madurez (medido como una función de la temperatura y del tiempo) tiene, aproximadamente, la misma resistencia relativa que cualquiera de las combinaciones de temperatura y tiempo para alcanzar el factor de madurez".

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Ingeniero Civil, Profesor del Departamento de Planificación, Urbanismo y Medioambiente, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Estadual Paulista, San Paulo, Brasil  
E-mail: fioriti@fct.unesp.br



(Salvador Filho et al., 2002) sugirieron que solo el tiempo del producto por la resistencia sería capaz de producir el mismo efecto de curado que el vapor en beneficio de la resistencia a la compresión. La función de Nurse-Saul adquiere la forma siguiente, más extensa debido a su simplicidad, como se aprecia en la Ecuación 1:

$$M(t) = \Sigma (T_a - T_o) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$M(t)$  = factor de la madurez a la edad  $t$  (°C.h)

$\Delta t$  = intervalo de tiempo (h)

$T_a$  = promedio de la temperatura en un intervalo de tiempo (°C)

$T_o$  = temperatura basal (°C)

La función desarrollada por Freiesleben-Hansen y Pedersen (FHP), basada en el modelo de Arrhenius para la dependencia de una reacción de la temperatura, se aplica más usualmente al método de la madurez, incluyendo un parámetro relacionado con la sensibilidad térmica de la reacción, llamada energía de activación aparente, como se aprecia en la Ecuación 2:

$$te = \sum_0^t \left[ \exp \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{Tr} \right) \right] \Delta t \quad (2)$$

$Ea$  = energía de activación aparente

$R$  = constante universal de los gases (8.314 J/mol.K);

$T$  = temperatura absoluta del concreto durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  (K)

$Tr$  = temperatura de referencia (K).

## 1.2 Energía de activación

Según (Barbosa et al., 2005), para aplicar el método de la madurez se debe contar con un parámetro de la sensibilidad térmica de la mezcla y con una evaluación de la dependencia de la velocidad de reacción de la hidratación del cemento con la temperatura, llamada energía de activación aparente (AE).

De acuerdo a (Fairbairn et al., 2002), la energía de activación se fundamenta en la idea de que las moléculas deben poseer una cantidad mínima de energía cinética para reaccionar. Esta energía es necesaria para transformar los reactivos y productos. En las reacciones exotérmicas (caso de la hidratación del cemento) los reactivos se encuentran en un estado de mayor energía que los productos. De esta forma, la energía de activación es la diferencia entre la energía necesaria para activar la reacción y el nivel de energía de los reactivos.

A una misma temperatura, las reacciones que tienen un valor de demanda de energía de activación (EA) muy alto se denominan reacciones lentas y varían hasta valores bajos de EA que indican que las reacciones ocurren rápidamente. Los valores más altos de EA señalan la necesidad de mayor energía para iniciar la reacción, lo que implica que esta reacción será más vulnerable a la influencia de la temperatura (Fairbairn et al., 2002).

Cualitativamente, la teoría de la colisión explica muy bien los cuatro factores que influyen en la velocidad de las reacciones (Scoares et al., 2006; Barbosa et al., 2005 y Fioriti et al., 2012):

- 1) La velocidad de una reacción química depende de la naturaleza de los reactivos químicos, ya que la energía de activación es diferente entre una reacción y otra.
- 2) La velocidad de reacción depende de la concentración de los reactivos porque el número de colisiones aumenta al aumentar la concentración.
- 3) La velocidad de reacción depende de la temperatura, porque un incremento de la temperatura hace que las moléculas sean más rápidas, aumentando la frecuencia de las colisiones.
- 4) La velocidad de reacción depende de la presencia de catalizadores, de modo que las colisiones sean más efectivas.

Según Arrhenius, la velocidad de una reacción química es una función de la llamada constante cinética ( $kt$ ) como en la siguiente Ecuación:

$$kt = A \cdot \exp \left( \frac{-E}{RT} \right) \quad (3)$$

$kt$  = constante cinética

$A$  = constante o factor de frecuencia.

Según (Peres et al., 2007), el factor de frecuencia se usa para cuantificar la probabilidad de que las colisiones ocurran en direcciones favorables para iniciar la reacción química, y con átomos ubicados de forma que posibiliten nuevas uniones. Cuando se trata de las reacciones de hidratación del cemento, el uso del término energía de activación aparente es más adecuado, ya que son procesos heterogéneos con diversas reacciones que ocurren simultáneamente.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Materiales

- **Cemento**

El cemento usado en esta investigación fue cemento Portland de resistencia temprana CPV-ARI PLUS. Todas sus características cumplan con la norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Las propiedades físicas y químicas del cemento se describen en la Tabla 1.

- **Agregados**

Como agregados finos se usó arena natural con un módulo de finura de 2,25 y una gravedad específica de 2,58 g/cm<sup>3</sup>. El agregado grueso (roca basáltica) tenía un tamaño máximo de 19mm y una gravedad específica de 2,96 g/cm<sup>3</sup>.

- **Superplastificante**

Se utilizó un superplastificante de tercera generación para el concreto, adecuado para la producción de concreto de alta resistencia, reduciendo enormemente la cantidad de agua necesaria, favoreciendo la trabajabilidad y la cohesión interna. Su nombre es Viscocrete 5 fabricado por Sika Brasil.

SPANISH VERSION.....

- **Cenizas de cascarilla de arroz (CCA)**

La cascarilla de arroz fue incinerada durante unas 48 horas aproximadamente bajo un proceso de combustión no controlado. La temperatura de combustión se encontraba en el rango de los 600°C a 850°C (Fioriti et al., 2013). La ceniza obtenida de color gris se pulverizó en un molino de bola durante 30 minutos.

Las características físicas y químicas se determinaron según la norma NBR 5733 (ABNT, 1991), véase Tabla 2. Además, se usó un analizador de tamaño de partículas por difracción láser para determinar las distribuciones de tamaño de partículas de la CCA.

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas del cemento

<b>Superf. específica por Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>		6916
<b>Gravedad específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		3,08
<b>Tiempo de fraguado inicial</b>		1:48
<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	3 días	33,4
	7 días	38,8
	28 días	45,0
<b>Ingredientes químicos</b>	SiO <sub>2</sub>	23,89
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,72
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,91
	CaO	51,27
	MgO	4,48
	SO <sub>3</sub>	3,55
	Na <sub>2</sub> O	0,18
K <sub>2</sub> O	0,96	

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas de la CCA

<b>Superf. específica por Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>		16196
<b>Gravedad específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>		2,16
<b>Media del tamaño de partícula (µm)</b>		12,34
<b>Pasa # 325 (%)</b>		96,6
<b>Ingredientes químicos</b>	SiO <sub>2</sub>	92,99
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,43
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18
	CaO	1,03
	MgO	0,35
	SO <sub>3</sub>	0,10
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61
	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93,50
	Na <sub>2</sub> O	0,02
K <sub>2</sub> O	0,72	

## 2.2 Composición de las mezclas de concreto

La Tabla 3 describe las mezclas usadas en la composición del concreto. El cemento fue sustituido por la CCA en masa, en dosificaciones de 0% (C), 5% (5C) y 10% (10C). El superplastificante se dosificó en 0,2% en masa de cemento + CCA para las mezclas sin adición de cenizas y con adición de 5% de ceniza. Para la mezcla al 10% de ceniza, la

dosificación utilizó 0,3% de superplastificante. El descenso de cono para cada trazo se estableció en 120±20 mm.

A continuación, se moldearon probetas cilíndricas de 10 x 20cm y fueron ensayadas a resistencia a la compresión. Los ensayos se realizaron a las edades de 7 y 28 días, con curado realizada en cámara húmeda.



Tabla 3. Composición de las mezclas de concreto

Cemento	Arena	Agregado grueso	A/C	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )		
				C	5C	10C
1	1,33	2,27	0,42	490,0	465,5	441,0

### 2.3 Determinación experimental de la energía de activación (EA)

El método de determinación de la energía de activación aparente del concreto, considerado según la C1074 (ASTM, 1998), se realizó a través de la resistencia a la compresión del mortero de concreto estudiado.

- **Moldeo y curado**

Las muestras de mortero fueron mezcladas en forma manual y se colocaron en moldes cúbicos de 5x5x5 cm. Se registró como tiempo inicial, el momento en que se agregó el agua a la mezcla. Una vez desmoldadas, las probetas se colocaron en sus respectivos lugares de curado. Se usaron temperaturas de 30°C, 55°C y 80°C. Las probetas que se curarían a 55°C y 80°C se colocaron primero en una cámara de vapor hasta la edad de la primera rotura; luego, una vez desmoldadas, se llevaron a cura termal. Después del baño termal, las probetas fueron colocadas en una cámara húmeda para ser curadas a 30°C hasta el momento de la primera rotura.

- **Ensayos de resistencia**

Durante el periodo inicial de curado, se retiró una probeta para practicarle el ensayo de resistencia a la compresión, marcando como tiempo final el valor de resistencia alcanzado aproximadamente a los 4 MPa. El tiempo final menos el tiempo inicial (en el momento en que se agregó agua a la mezcla) se usó para determinar el intervalo de rupturas. El tiempo final menos el inicial (en el instante en que el agua es añadida a la mezcla) determinó el intervalo

de tiempo de la primera edad de ruptura. A partir de ahí, las cinco rupturas siguientes fueron realizadas en edades con el doble de tiempo de la edad inmediatamente anterior. Se ensayaron seis probetas por edad, como se muestra en la Figura 1.

Para el curado termal se moldearon probetas cilíndricas de 100 x 200mm, algunas fueron llevadas a cámara húmeda y las demás a curado termal. Las probetas usadas para el curado termal fueron selladas con un film plástico para evitar la pérdida de humedad durante el proceso. Durante el proceso, se monitoreó la temperatura usando termocoplas instaladas en seis probetas. Para ello, se colocaron tubos de cobre en las probetas, donde las termocoplas se llenan con aceite y se sellan. El registro de los datos se realizó mediante multímetros digitales con sistema de adquisición automático. Las lecturas se realizaron a intervalos de cinco minutos.

Luego de este procedimiento, las probetas fueron colocadas de inmediato en el equipo de curado termal, a una temperatura ya determinada de 80°C. El curado se realizó en un ambiente de vapor saturado a temperatura constante, teniendo una pequeña variación sólo en el momento en que las probetas fueron retiradas para ser sometidas a los ensayos.

El retiro de las probetas se realizó a intervalos de 1 hora, durante un ciclo de curado de 6 horas. La resistencia a la compresión fue ensayada en cuanto fueron retiradas del curado. Las probetas curadas en cámara húmeda fueron ensayadas a los 7 y 28 días.

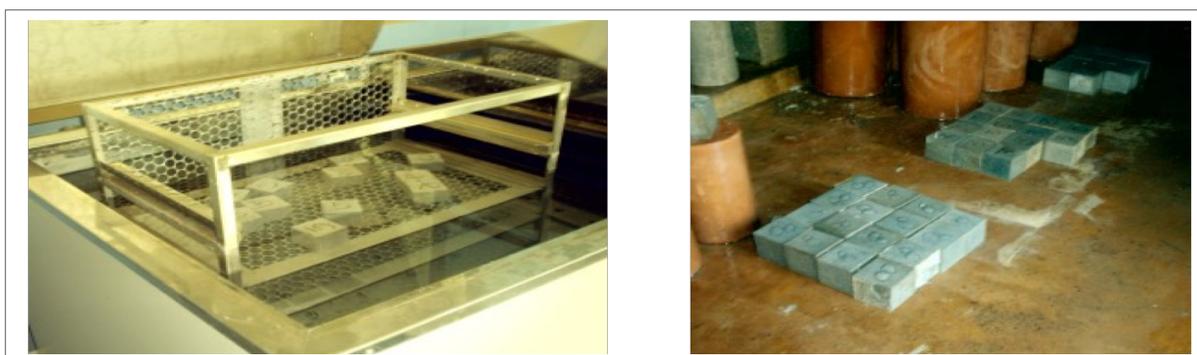


Figura 1. Probetas en curado termal y en cámara húmeda, respectivamente

### 3. Resultados y análisis

- **Cálculo de la energía de activación aparente (EA)**

Las Tablas 4, 5 y 6 presentan los valores finales de EA para las mezclas usadas junto a los comentarios necesarios.

Se confeccionó un gráfico con los valores de  $k$  y las temperaturas en  $^{\circ}\text{C}$ , para determinar  $T_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), esto es la temperatura basal, temperatura bajo la cual se supone que las reacciones de hidratación no ocurren. Este valor es tomado de la intersección de la línea recta en el eje  $x$  (temperatura), en la Figura 2.

El valor de  $Q$  es tomado del gráfico con los valores de

$\ln(k)$  para el inverso de la temperatura en grados Kelvin ( $1/\text{K}$ ).

$Q$  es la inclinación de la línea recta; se usa en la ecuación que determina el valor de la EA. Con la Ecuación 4 se obtiene el valor de EA:

$$EA = \frac{Q \times R}{1000} \quad (4)$$

Donde  $R$  es la constante universal de los gases ( $8,314 \text{ J/mol.K}$ ).

**Tabla 4.** EA (mezcla de control)

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	T (K)	1/K	k	ln (k)
30	303	0,0033	0,4863	-0,7209
55	328	0,0030	4,0782	1,4057
80	353	0,0028	5,6248	1,7272
<b>To (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>		<b>Q</b>	<b>EA (KJ/mol)</b>	
21,94		5324,80	44.27	

**Tabla 5.** EA (mezcla 5C)

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	T (K)	1/K	k	ln (k)
30	303	0,0033	0,6022	-0,5072
55	328	0,0030	3,0243	1,1067
80	353	0,0028	4,5239	1,5094
<b>To (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>		<b>Q</b>	<b>EA (KJ/mol)</b>	
20,37		4371,10	36,34	

**Tabla 6.** EA (mezcla 10C)

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	T (K)	1/K	k	ln (k)
30	303	0,0033	0,5238	-0,6466
55	328	0,0030	3,9895	1,3837
80	353	0,0028	5,9973	1,7913
<b>To (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>		<b>Q</b>	<b>EA (KJ/mol)</b>	
22,99		5293,20	44,01	



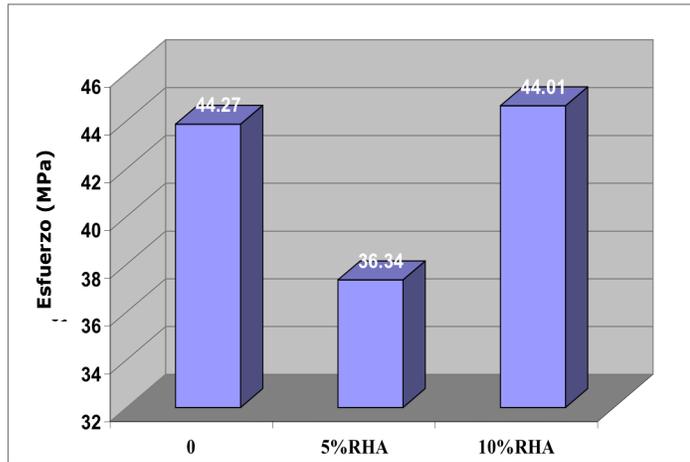


Figura 2. EA para las mezclas

- **Curado en húmedo**

Como lo demuestra la Tabla 7, las dos dosificaciones de CCA entregan al concreto una ganancia de resistencia. A los 28 días, la mezcla 5C alcanzó un 25,8% más de resistencia

que la mezcla de control. Con un 10% de CCA, la resistencia obtenida a los 28 días fue de 11,9%.

Tabla 7. Resistencia a la compresión

Mezclas	7 días	28 días
	(MPa)	(MPa)
C	46,2	48,9
5C	53,3	61,5
10C	46,28	54,7

- **Cálculo de la madurez**

El cálculo del índice de madurez del concreto analizado se realizó de acuerdo a la norma C1074 (ASTM, 1998), cuyo procedimiento permite expresar este índice en términos del factor de la madurez (Ecuación 1) o edad equivalente (Ecuación 2). En este trabajo, se expresaron los resultados según las dos ecuaciones.

Para el cálculo del factor de la madurez es necesario usar el valor de la temperatura base del concreto, determinado mientras se alcanzan los valores de la EA de las mezclas analizadas y efectuado previamente de acuerdo con los

procedimientos de la C1074 (ASTM, 1998). La Figura 3 muestra que la relación entre el factor de madurez y la evolución de la resistencia a la compresión. La Figura 4 muestra la relación con la equivalencia en edad.

Las curvas de tendencia agregadas a los datos en los gráficos representan las relaciones entre el índice de madurez y la resistencia a la compresión del concreto, y son las mismas usadas para estimar la resistencia del concreto curado bajo otras condiciones de temperatura.

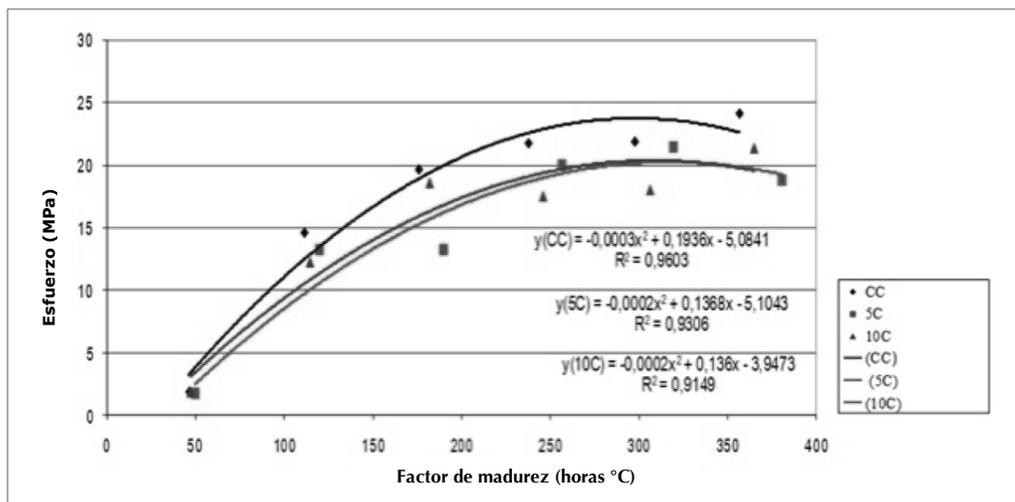


Figura 3. Factor de madurez versus resistencia a la compresión

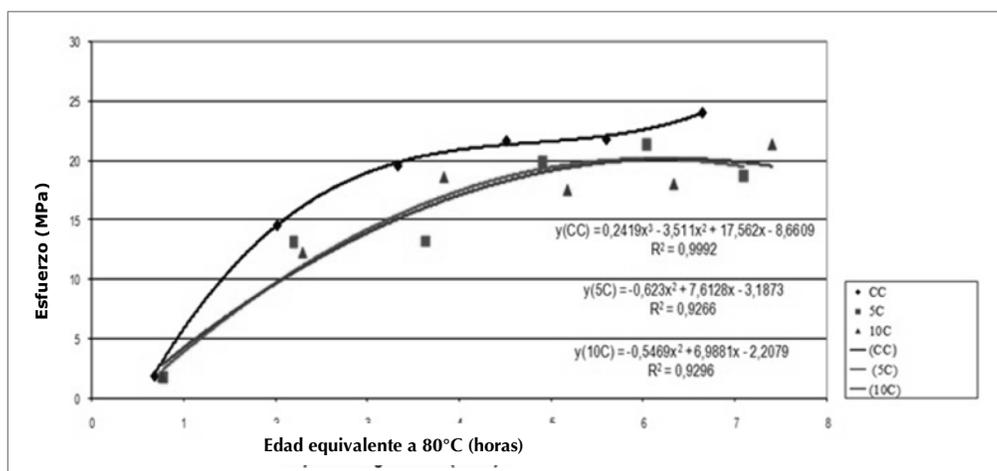


Figura 4. Edad equivalente versus resistencia a la compresión

#### 4. Conclusión

Analizando los resultados presentados en este trabajo, se puede verificar la influencia de la adición de CCA en el comportamiento del concreto, tanto en la cámara húmeda como en el curado termal, mediante el concepto o método de la madurez. En cuanto al curado en cámara húmeda, es importante observar que la ganancia de resistencia ocurre a ambas edades evaluadas, para ambas dosificaciones de CCA, siendo la dosificación menor (5%) la que obtiene mejores resultados, alcanzando un 25,8% a los 28 días. En el caso de la cura termal, los resultados obtenidos para la resistencia tuvieron un comportamiento inverso; la adición de CCA no promovió la ganancia de resistencia en relación a la mezcla de control, durante del ciclo de 6 horas estudiado. En el estudio de la aplicación del método de la madurez, también se puede verificar la influencia de la CCA en las mezclas analizadas:

- En las Figuras 3 y 4 podemos observar que las curvas que representan el índice de madurez para el concreto poseen valores cercanos de tensión solamente en el intervalo inicial; sin embargo, los valores para la mezclas de control (CC) parecen ser valores mayores hasta el final de la curva.
- En el índice de madurez, expresado en términos del factor de la madurez (Figura 3), las curvas que representan los trazos con adición de CCA tienen aproximadamente el mismo valor de tensión a lo largo de toda la curva.



- Lo mismo sucede cuando se expresa este índice en términos de la edad, equivalente a 80°C (Figura 4), siendo los valores de tensión aún más cercanos que en el caso anterior, para las curvas de las mezclas con CCA.
- Como se aprecia, la variación de la dosificación de CCA en la mezcla no modificó los resultados del índice de madurez, en ninguno de los dos casos.
- La introducción de la CCA probablemente influyó en la tasa de hidratación del cemento, modificando los tiempos de reacción de las puzzolanas, diferenciando las mezclas en relación a su índice de madurez que es una característica propia de cada mezclacementicia.

## 5. Referencias

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1991)**, NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, Brasil.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (1998)**, C1074: Practice for estimating concrete strength by the maturity method. Annual Books of ASTM Standards, v.04.02. Philadelphia, United States of America.
- Barbosa M. P., Pinto R. C. A. and Peres L. D. P. (2005)**, The influence of silica fume on the apparent activation energy of HPC mixtures. ACI Special Publication, Farmington Hills – EUA, v.229, 423-434.
- Fairbairn E. M. R., Carvalho A. G., Tolêdo-Filho R. D., Silvano M. M., Andrade W. P. and Albuquerque A. C. (2002)**, Energia de ativação dos concretos: experimentação e modelagem. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44, Belo Horizonte, 1-16.
- Fioriti C. F., Tashima M. M., Akasaki J. L., Bernabeu J. P., Sousa L. C. and Melges J. L. P. (2012)**, Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozoalânica. Ambiente Construído (Online), v. 12, 151-163.
- Fioriti C. F., Barbosa M. B., Pereira A. M., Akasaki J. L., Fazzan J. V., Tashima M. M., Bernabeu J. J. P. and Melges J. L. P. (2013)**, Impact strength and abrasion resistance of high strength concrete with rice husk ash and rubber tires. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 6, 811-820.
- Peres L. D. P., Barbosa M. P. and Pinto R. C. A. (2007)**, Avaliação da resistência à compressão do concreto em vigas pré-moldadas submetidas à cura térmica por meio do método da maturidade. Ibracon Structures and Materials Journal, v.3, 121-142.
- Salvador Filho J. A. A., Barbosa M. P. and Pinto R. de A. C. (2002)**, Avaliação das propriedades mecânicas do CAD usando o método da maturidade. Ibracon Structures and Materials Journal, 28, 27-38.
- Scoaris M. R., Barbosa M. P. and Pinto Junior N. O. (2006)**, Strength and stiffness evaluation of fiber reinforced concrete under steam cure by maturity method. E-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil (Porto Alegre), v.2(2), 127-141.