

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



MFC
Facultad de Matemática
Física y Computación

Departamento de Física

Caracterización y determinación de los parámetros cinéticos del proceso de transporte de agua en hormigones mezclados con cenizas de residuos del bambú

Autor: Raikol Ortega Rodríguez

Tutores: Dr. Ernesto Villar Cociña
Dr. Jesús Hernández Ruiz

Santa Clara Julio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



MFC
Facultad de Matemática
Física y Computación

Physics Department

Characterization and determination of kinetics parameters of water transport process in concrete mixed with ash from bamboo wasted

Author: Raikol Ortega Rodríguez

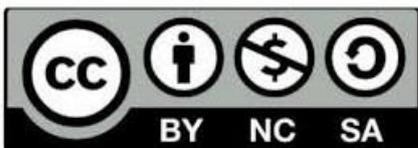
Thesis directors: Dr. Ernesto Villar Cociña
Dr. Jesús Hernández Ruiz

Santa Clara July, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

Pensamiento

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”

Albert Einstein

Dedicatoria

A mi madre Miriam por su ejemplo, su fuerza y su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mi padre Edey por enseñarme a ser una mejor persona y sembrar esa pequeña semilla de sentir pasión por todo lo que haga en la vida.

A mi hermana por ser la luz de mi vida y la razón que me impulsa a ser mejor cada día.

A mis abuelos y en especial a mi abuela Mirta por sus buenos consejos, su inmenso amor, por apoyarme y cuidarme durante toda mi vida.

A mi prometida por su amor, compromiso, dedicación, positividad y sobre todo por tener esa capacidad de sacar lo mejor de mí.

A mi tía Mirelis por siempre estar presente en cada momento de mi vida y transmitirme toda su alegría y energía.

Agradecimientos

A mis tutores Ernesto Villar Cociña y Jesús Hernández Ruiz por asumir este desafío y brindarme su apoyo y conocimiento.

A todos los profesores que me ayudaron durante estos cinco años.

A los técnicos del laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones en la Universidad Marta Abreu de las Villas por ayudarme durante todo el experimento.

A los técnicos de los laboratorios de Física de mi facultad en especial a Aldiel.

A Alejandro León Grande por la paciencia que tuvo conmigo durante estos 5 años.

A toda mi familia en general porque de una manera u otra siempre me han brindado su apoyo durante algún momento de mi vida.

A mis suegros por sus buenos consejos y tratarme como a un hijo.

A todos los amigos que me han acompañado por la vida que los pongos de últimos porque para mí son considerados como FAMILIA y a las familias nunca les interesa el lugar donde se les pongas. En especial para mi hermano Carlos, para ese pequeño grupo de amigos que conocí en el IPVCE y todas esas amistades que he ido haciendo durante todos estos años de estudio de mi carrera.

Resumen

El concreto, el material de construcción más ampliamente usado en el mundo, consume grandes cantidades de recursos y emite significativos gases de efecto invernadero durante su producción. En orden de obtener un producto más ecológico y de paso mejorar las principales propiedades del concreto, muchas investigaciones se han centrado en sustituir el *Clinker* del cemento por materiales puzolánicos. En este trabajo se caracteriza cualitativa y cuantitativamente el proceso de absorción de agua en concretos mezclados con residuos de ceniza de hoja de bambú cubano (CHBC) y Cemento *Portland* Ordinario (CPO) en diferentes proporciones (0 %, 10 %, 15 % y 20 %) mediante el modelo capilar – difusivo. Los resultados mostraron que los coeficientes de absorción para los hormigones fabricados con mezclas de CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 %, y CPO + CHCB 20 % fueron de $1.73 \cdot 10^{-2} \pm 0.09 \cdot 10^{-2}$, $2.88 \cdot 10^{-3} \pm 0.19 \cdot 10^{-3}$, $1.66 \cdot 10^{-3} \pm 0.10 \cdot 10^{-3}$ y $1.93 \cdot 10^{-3} \pm 0.28 \cdot 10^{-3}$ respectivamente. El concreto formado a partir de una mezcla de 15 % de residuo de CHBC y CPO fue el que presentó menor coeficiente de absorción.

Palabras clave: Hormigón, ceniza de hoja de bambú, puzolana, modelo capilar – difusivo, parámetros cinéticos.

Abstract

Concrete, the most widely used construction material in the world, consumes a large amount of resources and emits significant greenhouse gases during production. In order to obtain an ecologist product and improve the concrete proprieties, many researches have been studies the substitution of Clinker with pozzolans materials. This paper reports a qualitative and quantitative characterization of the water absorption process in mixtures concretes with Cuban bamboo leaves ashes (blash) and Ordinary Portland Cement (OPC) in different proportions (0 %, 10 %, 15 % y 20 %) using the capillary - diffusive model. The results showed the absortion coefficient for mixture blash and OPC concrete in proportions of 0 %, 10 %, 15 % y 20 % was $1.73 \cdot 10^{-2} \pm 0.09 \cdot 10^{-2}$, $2.88 \cdot 10^{-3} \pm 0.19 \cdot 10^{-3}$, $1.66 \cdot 10^{-3} \pm 0.10 \cdot 10^{-3}$ and $1.93 \cdot 10^{-3} \pm 0.28 \cdot 10^{-3}$ respectively. The mixtures 15 % of blash and OPC concrete showed the lower absortion coefficient.

Keywords: Concrete, bamboo leaf ash, pozzolan, capillary model - diffusive, kinetic parameters

Tabla de Contenido

Resumen.....	5
Abstract	8
Índice de figuras	11
Índice de tablas	12
Listado de abreviaturas empleadas	13
Introducción	14
Capítulo I: Antecedentes	17
1.1 Cemento Portland	17
1.1.1 Producción, composición e hidratación del cemento Portland	17
1.2 Propiedades del hormigón	18
1.2.1. Durabilidad	19
1.2.2 Permeabilidad	19
1.2.3 Absorción capilar	20
1.2.4 Difusión	21
1.3 Degradación del hormigón	23
1.3.1 Penetración del CO ₂	24
1.3.2 Penetración de iones cloruro	24
1.4 Emisión de CO ₂ y otros contaminantes	24
1.5 Adiciones reactivas.....	25
1.5.1 Adiciones reactivas más utilizadas	28
1.6 Caracterización de la ceniza de Bambú.....	31
1.6.1 Composición química y mineralógica de las cenizas de Bambú.....	31
1.6.2 Actividad puzolánica de la ceniza de Bambú: Evaluación cualitativa.	32
1.7 Formulación del problema de absorción de agua en concretos armados. Modelo capilar - difusivo	33
Capítulo 2: Materiales y Métodos	38
2.1 Materiales empleados en la elaboración de las probetas	38
2.1.1 Cenizas de residuos de Bambú.....	38
2.1.2 Cemento Portland	38
2.1.3 Árido y agua.....	38
2.2 Elaboración de las probetas	40
2.3 Ensayo de humectación de las probetas.....	41
Capítulo 3. Resultados y discusión	43

3.1 Análisis cualitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que posee CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %.....	43
3.2 Análisis cuantitativo del proceso de absorción de agua. Cálculo de los parámetros cinéticos.	44
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50

Índice de figuras

Figura 1.1: Patrón de XRD de la ceniza de hojas de Bambú a 600 °C.....	26
Figura 1.2: Microscopía electrónica de la ceniza de hoja de bambú calcinada a 600 °C.....	27
Figura 1.3: Variación de la conductividad con el tiempo de reacción para la CHBC a 600 °C.....	27
Figura 2.1: Proceso de mezclado del cemento con los aditivos.....	35
Figura 2.2: Disposición de cada una de las probetas durante el ensayo de humectación.....	36
Figura 3.1: Curvas de absorción para las muestras de CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %.....	38
Figura 3.2: Cantidad de agua absorbida por unidad de área para las muestras: a) CPO, b) CPO + CHBC 10 %, c) CPO + CHBC 15 %y CPO + CHBC 20 %.....	39

Índice de tablas

Tabla 1.1: Contenido de fases del cemento <i>Portland</i>	13
Tabla 1.2 Proceso de transporte en el hormigón.....	18
Tabla 1.3: Composición química de ceniza de hoja de Bambú calcinada a 600 °C.....	27
Tabla 2.1 Propiedades físicas y mecánicas del cementos P-35.....	33
Tabla 2.2. Resultados de los ensayos.....	34
Tabla 2.3 Análisis granulométrico.....	35
Tabla 2.4 Composición de los diferentes tipos de probetas fabricadas.....	36
Tabla 3.1 Parámetros cinéticos.....	41

Listado de abreviaturas empleadas

CHCB.....	Ceniza de hoja de bambú
CPO.....	Cemento <i>Portland</i> ordinario
CBC.....	Ceniza de bagazo de caña de azúcar
HS.....	Humo de sílice
CAP.....	Ceniza de combustible de aceite de palma
CMM.....	Ceniza de mazorca de maíz
CCA.....	Ceniza de cáscara de arroz
C-S-H.....	Silicatos de calcio hidratados
CH.....	Hidróxido de calcio
CaO.....	Cal libre

Introducción

El desarrollo alcanzado por la humanidad está muy relacionado con los materiales, con las tecnologías para su elaboración, las medidas para su almacenamiento, explotación y uso. El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizado en la actualidad, se estima que la producción de cemento es de aproximadamente 13000 t por año, esto es cerca de 2 t por persona al año (Zhang *et al.*, 2018). Debido a la enorme demanda de cemento a nivel mundial, la producción de este es el responsable del 5 al 8 % de las emisiones globales de CO₂ al emplear alrededor del 7 % del consumo total de energía del sector industrial mundial (Martirena, 2011).

Con el objetivo de disminuir la contaminación ambiental provocada por la producción de cemento, se están realizando numerosas investigaciones y trazando estrategias como la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles, la reducción del factor de *Clinker*, y más recientemente la captura y almacenaje del CO₂. Pero estas alteraciones en la producción de este material pueden afectar sus propiedades, esto abre todo un campo de estudio debido a que las investigaciones no solo se centran en la búsqueda de un cemento biosostenible, sino que buscan maneras de mejorar las propiedades de este, de manera que se obtenga un material más eficiente, económico y ecológico.

Muchas de estas investigaciones se centran en la reducción del *Clinker* sustituyéndolo por puzolanas que generalmente se obtienen en la producción de otros materiales, residuos agroindustriales, desperdicios de las fabricaciones de hormigón, etcétera.

Una de las principales propiedades del cemento, afectada por su exposición al medio y las condiciones climáticas, es la durabilidad de las estructuras de hormigón. La reducción del tiempo de vida útil de estas estructuras se debe a los fenómenos de corrosión, asociado con la absorción y difusión de agua, la cual sirve de vehículo para la penetración de iones cloruro en el hormigón.

Debido a sus implicaciones económicas, el problema de transporte de agua en materiales de construcción ha recibido gran atención en el pasado y también en el presente. Una mejor comprensión del fenómeno de absorción de agua y transferencia de humedad puede reducir o prevenir serios daños en ellos. Es por eso que el problema de lograr un material más eficaz y con menor permeabilidad, ha sido una de la problemáticas que han tratado de resolver los investigadores del tema hoy en día.

Investigaciones anteriores de Cociña y Rodier (Rodier *et al.*, 2019) reportan que las cenizas de hojas de bambú cubano (CHBC) presentan alto contenido de sílice comparable con el humo de

sílice (considerada la puzolana de mejores resultados estudiados). Debido a esto se desea verificar la propiedad de durabilidad del hormigón con diferentes por ciento de agregado de CHBC (0 %, 10 %, 15 % y 20 %) utilizando el modelo capilar – difusivo. Este modelo describe el comportamiento de la absorción de agua no solo a edades tempranas del experimento donde predomina el proceso de absorción capilar, sino también durante todo el proceso teniendo en cuenta la difusión de humedad a través de los poros más finos y poros de gel, lo que permite obtener los coeficientes cinéticos de todo el proceso.

Problemática: Se desconocen las características cuantitativas del proceso de absorción de agua en hormigones mezclados con ceniza de hoja de bambú cubano.

Problema científico: Necesidad de caracterizar cualitativa y cuantitativamente los parámetros cinéticos en el proceso de absorción de agua en hormigones con agregado de cenizas de hojas de bambú cubano.

Población: Está constituida por los materiales puzolánicos artificiales.

Muestra: Está constituida por la ceniza de hoja de bambú cubana recolectada en el campus de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las villas.

Hipótesis: Si se caracteriza cualitativa y cuantitativamente la cinética del proceso de absorción de agua en hormigones mezclados con ceniza de hoja de bambú cubano, entonces es posible obtener hormigones de mejores prestaciones.

Objetivo general:

Caracterizar cualitativa y cuantitativamente la cinética del proceso de absorción de agua en hormigones mezclados con residuos de ceniza de hoja de bambú cubano con el propósito de obtener hormigones de mejores prestaciones.

Objetivos específicos:

- Fabricar hormigones con cemento *Portland* ordinario con adiciones de residuo de cenizas de hoja de bambú cubano en 10 %, 15 %, y 20 %.
- Estudiar experimentalmente el proceso de transporte de agua en hormigones fabricados con cemento *Portland* ordinario con adiciones de residuo de cenizas de hoja de bambú cubano en 10 %, 15 %, y 20 %.

- Estimar los parámetros cinéticos del proceso de hidratación de los hormigones fabricados con cemento *Portland* ordinario y adiciones de residuo de ceniza de hoja de bambú en 10 %, 15 %, y 20 % mediante la aplicación del modelo capilar - difusivo.

Tareas:

- Investigación documental sobre los materiales puzolánicos, los hormigones, sus propiedades fundamentales y el proceso de hidratación de los hormigones y su impacto en el tiempo de vida útil de éstos.
- Fabricación de hormigones con cemento *Portland* ordinario con adiciones de residuo de ceniza de hoja de bambú cubano en 10 %, 15 % y 20 %.
- Estimación de los parámetros cinéticos del proceso de hidratación de los hormigones fabricados con cemento *Portland* ordinario y adiciones de residuo de ceniza de hoja de bambú en 10 %, 15 %, y 20 % mediante la aplicación del modelo capilar – difusivo.

Estructura de la tesis:

- Capitulo I. Antecedentes
- Capitulo II. Materiales y Métodos
- Capitulo III. Resultados y discusión
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencias bibliográficas

Capítulo I: Antecedentes

1.1 Cemento *Portland*

El cemento *Portland* es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido, que amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medios de reacciones y procesos de hidratación y una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad (Powers, 1958).

El descubrimiento del cemento *Portland* (CPO) como material cementante, patentado en el año 1824 por Joseph Aspdin, ha sido sin lugar a dudas uno de los acontecimientos más importantes en la historia de los materiales de construcción. Su uso prácticamente en todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de lograr una producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones ha motivado que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecieron, los cuales han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería (Martirena, 2009).

1.1.1 Producción, composición e hidratación del cemento *Portland*

El cemento *Portland* contiene silicatos y aluminatos de calcio formados mediante una secuencia de procesos térmicos y químicos, incluyendo la descomposición de la caliza, la reacción con otros materiales de cantera tales como la arcilla, el mineral de hierro, y la arena. La fusión parcial de estos componentes da origen a la formación de nódulos duros, redondeados denominados *Clinker*. Todo esto ocurre a la temperatura de 1450 °C en un horno rotatorio de una planta de cemento. Después del enfriamiento, el *Clinker* se muele junto con aproximadamente 5 % de yeso (sulfato de calcio deshidratado) hasta una finura tipo harina, produciendo el producto final, cemento *Portland* (Johansen and Taylor, 2002).

La composición del cemento es el factor de influencia más importante. Existen dos formas en que puede describirse la composición del cemento, mediante la composición de los óxidos y mediante la composición química (Lin and Meyer, 2009).

Los principales minerales (o fases) que componen al cemento *Portland* son los siguientes: alita $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, (C_3S), belita $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, (C_2S), aluminato tricálcico $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A), ferritoaluminato tetracálcico $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), yeso $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, cal libre CaO , periclusa MgO , álcalis. Na_2O y K_2O , vidrio (Adrian Licor Cebey, 2016).

La alita es la fase principal del cemento (45-60 %) y determina la rapidez del fraguado, la resistencia mecánica y otras propiedades del cemento *Portland* (Adrian Licor Cebey, 2016).

La belita es el segundo mineral silíceo por su importancia y contenido que compone el *Clinker*. Endurece con lentitud, pero alcanza elevada resistencia mecánica después de un fraguado prolongado del cemento *Portland* (Adrian Licor Cebey, 2016).

El aluminato tricálcico viene representado en el *Clinker* en una cantidad de 4 a 12 %, se hidrata y fragua con rapidez, pero tiene pequeña resistencia mecánica (Adrian Licor Cebey, 2016).

La ferrita constituye en el *Clinker* una cantidad del 10 al 20 %. Partiendo de la velocidad de hidratación, el mineral ocupa una posición intermedia entre la alita y la belita, por eso no ejerce una influencia determinante sobre la velocidad del fraguado y del desprendimiento de calor del cemento *Portland*.

Tabla 1.1: Contenido de fases del cemento *Portland*.

Compuesto	Nombre de las fases	Cantidad típica
Silicato tricálcico	Alita	45-60%
Silicato dicálcico	Belita	20-30%
Aluminato tricálcico	Aluminato	4-12%
Ferritoaluminato tetracálcico	Ferrita	10-20%

En el proceso de la hidratación del cemento (reacción del cemento con agua) el volumen sólido de la pasta aumenta, convirtiéndose en un sólido rígido. Los productos de esta reacción, llamados hidratos, dan al cemento su propiedad de aglutinante y son los responsables del desarrollo de su fuerza.

1.2 Propiedades del hormigón

El hormigón es una mezcla íntima y homogénea de cemento, agua, áridos finos, áridos gruesos, aditivos y adiciones, en las debidas proporciones para que fragüe y endurezca. Desde el punto de vista de su elaboración es un material relativamente económico. Es ampliamente utilizado en la construcción debido a que es un material muy durable en la intemperie, es resistente al agua y prácticamente impermeable, presenta muy buena resistencia a la compresión y es de fácil

laborabilidad. En el momento de su amasado pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas de sus características (Adrian Licor Cebey, 2016; Ulloa, 2018).

1.2.1. Durabilidad

La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural (Bas, 2008).

Los principales procesos de deterioro están ampliamente relacionados a las condiciones naturales a las que está sometido (temperaturas extremas, la abrasión y erosión) y a los agentes agresivos externos provenientes del ambiente, que se introducen al interior de la estructura generalmente en solución reaccionando con la pasta cementicia. Existe una importante lista de sustancias y agentes agresivos para el hormigón, entre los que se destacan las más habituales son las aguas blandas, los ácidos y algunas sales en solución que contienen sulfatos, amonio y magnesio solubles (Bas, 2008).

La durabilidad del concreto depende en gran medida de la facilidad (o dificultad) en la que los fluidos (agua, CO₂, oxígeno) en forma de líquido o de gas pueden migrar a través de la masa de concreto. Debido a que el concreto es un material poroso, el movimiento de partículas a través de este puede ocurrir por flujo, difusión o absorción (Bas, 2008).

Se ha demostrado que la durabilidad del hormigón está íntimamente relacionada con su permeabilidad (Muller *et al.*, 2015). Al mismo tiempo varios autores describen que el uso de cementos compuestos que incorporan adiciones reactivas como el humo de sílice, la escoria granulada, las cenizas de cáscara de arroz y otros residuos agrícolas han demostrado ser beneficiosos en la mejora de la durabilidad de estructuras de hormigón, mediante la reducción de la penetración de sustancias agresivas (Xu *et al.*, 2015).

1.2.2 Permeabilidad

Como se explicó en el epígrafe anterior, la durabilidad del hormigón está fuertemente relacionada con su permeabilidad, entendida esta última como, la capacidad que posee un determinado material de permitir el paso de un fluido a través de su estructura, sin que se produzcan alteraciones o modificaciones de ésta. Si el material no permite el paso del fluido o si la cantidad de fluido que atraviesa al material dado es despreciable, se dice impermeable y cuando el fluido atraviesa parcialmente al material, entonces este es semipermeable.

La permeabilidad total del concreto al agua es función de la permeabilidad de la pasta, la permeabilidad y la granulometría del agregado, la calidad de la pasta y de la zona de transición del agregado y la proporción relativa de pasta y agregado. La disminución de la permeabilidad aumenta la resistencia al congelamiento y deshielo del concreto, restauración, penetración de sulfatos y de iones cloruro y otros ataques químicos.

La permeabilidad del concreto se calcula a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que atraviesa el material, debido justamente a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la cara que no lo está. El flujo de agua a través del concreto debido al empuje del líquido (gracias a la gravedad) depende de factores externos al material como la altura de la lámina de agua y el espesor del elemento pero también de factores internos como la capacidad del material para contener el agua, o sea la porosidad de este.

La permeabilidad de cualquier material poroso, se determina mediante la ley de Darcy:

$$k_i = CD^2, \quad (1.1)$$

donde:

k_i : permeabilidad del material, expresada en unidades de longitud al cuadrado,

C : constante adimensional relacionada con la configuración del fluido y

D : diámetro promedio de los poros del material, expresado en unidades de longitud.

Es conocido que la adición de materiales reactivos como las puzolanas producen silicatos de calcio hidratados (C-S-H) en su reacción con el hidróxido de calcio que se genera en la hidratación del cemento, estos C-S-H contribuyen a densificar la microestructura del hormigón, disminuir su porosidad y aumentar la resistencia. De esta manera, con la adición de materiales reactivos con el cemento se puede disminuir la porosidad del hormigón y por tanto disminuir su permeabilidad lo que aumenta consecuentemente su durabilidad (Cruz, 2015).

1.2.3 Absorción capilar

La tasa de absorción capilar es una propiedad hidráulica fácilmente mensurable, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos ambientales. La absorción capilar es un caso especial de transporte inducido por la tensión superficial del agua actuando sobre los capilares del hormigón. El hormigón ejerce acciones

atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido provocando con las mismas el llenado de los espacios existentes en su masa (Taus, 2003).

La absorción capilar puede ser medida en morteros y hormigones parcialmente saturados, no produciéndose el fenómeno de absorción en los materiales saturados (capilares totalmente llenos de agua), mientras que en los materiales totalmente secos la absorción del agua se efectúa en los capilares y también en el gel, por lo cual los resultados no son comparables por encontrarse distorsionados. Por lo tanto la tasa de absorción capilar dependerá del contenido inicial de agua y de su uniformidad, por lo que el pre acondicionamiento de las muestras constituye un factor determinante a la hora de comparar los resultados. Es necesario entonces seguir un procedimiento estandarizado en el secado de las muestras que garantice una distribución uniforme de la humedad en todo el espesor de las mismas (Taus, 2003).

Además del contenido inicial de humedad y de su uniformidad, el transporte de líquidos en sólidos porosos está influenciado por las características del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial), por las características del sólido poroso (estructura de poros y energía superficial), tiempo y condiciones de curado, características de las mezclas y temperatura (Taus, 2003).

Cuando se somete una muestra de hormigón al contacto con agua por una de sus caras, la cantidad acumulada de agua (i) que puede ser absorbida por los capilares del hormigón, considerando un flujo unidireccional de ascenso, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, es decir:

$$i = S * t^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2)$$

donde:

i = masa acumulada de agua absorbida por unidad de área de la sección mojada kg/m^2 ,

t = tiempo de inmersión o exposición expresado en horas y

S = coeficiente de absorción capilar, en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$.

1.2.4 Difusión

Se llama difusión a uno de los varios procesos de transporte que ocurren en la naturaleza, en el cual una o más sustancias son transportadas de una parte a otra de un sistema como resultado del movimiento molecular aleatorio. Moviéndose desde donde se encuentra la mayor

concentración hacia donde se encuentra la menor concentración, es decir, en dirección del decrecimiento del gradiente de concentración.

Normalmente los procesos de difusión están sujetos a la Ley de Fick. Esta ley declara la relación entre el flujo de sustancia y el gradiente de concentración de ésta. Dicha ley puede expresarse como:

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}C, \quad (1.3)$$

donde:

\vec{J} : intensidad del flujo de sustancia en la dirección en que está ocurriendo el transporte de la especie dada,

D : coeficiente de difusión,

C : concentración de la especie que se difunde y

$\vec{\nabla}$: operador diferencial vectorial nábla u operador de Hamilton.

Al relacionar las variaciones de la concentración con el tiempo y el espacio durante el proceso de difusión, el flujo se considera no estacionario y se aplica la segunda Ley de Fick. En el caso en que el coeficiente de difusión puede ser considerado constante la ecuación es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C, \quad (1.4)$$

donde:

$\nabla^2 C$: es el operador laplaciano aplicado a la concentración y en dependencia de la geometría a la que se aplique y

t : es tiempo.

Para el caso unidimensional la ecuación de la segunda Ley de Fick queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.5)$$

donde x : es la longitud de penetración en sentido normal a la sección.

1.3 Degradación del hormigón

Los ataques más frecuentes que pueden provocar una reacción de corrosión del hormigón son las penetración de CO₂ y la penetración de iones en especial los cloruros. Estos ataques usualmente se valen de dos mecanismos de transporte la difusión y la permeabilidad al agua. Además es posible la combinación de dos o más mecanismo, como el efecto mecha, donde una cara de la pieza está saturada y la otra al aire libre. Los agentes agresivos se pueden transportar por efecto conjunto de absorción capilar, penetración de agua por presión y vaporización de agua (Tabla 1.2) (Bas, 2008).

Tabla 1.2 Proceso de transporte en el hormigón.

Procesos en el hormigón	Exposición del hormigón	Proceso de transporte
Penetración de sustancias disueltas (cloruros, sulfato, etc.)	Saturado	Difusión iónica
	Bajo carga hidrostática	Permeabilidad
	Cara saturada / Cara en aire	Efecto de mecha
	Mojado y seco	Absorción capilar
Penetración de agua (túneles, sótanos, estructuras de retención de agua etc.)	Bajo carga hidrostática	Permeabilidad
	Cara saturada / Cara en aire	Efecto de mecha
	Cara en aire (húmedo) y cara en aire seco	Difusión de vapor
Carbonatación	CO ₂	Difusión + carbonatación

1.3.1 Penetración del CO₂

La carbonatación es un tipo de reacción ácida que afecta la durabilidad del hormigón. Se debe a la penetración de CO₂ en la zona superficial de la masa del hormigón. Las fuentes de CO₂ son el propio aire de la atmósfera o puede estar disuelto en el agua. Este tiende a disolverse en los poros y a reaccionar con la cal libre y otros compuestos cálcicos que se encuentran en el hormigón.

En la carbonatación, el anhídrido carbónico atmosférico que se difunde a través de los poros llenos de aire del hormigón reacciona con el hidróxido de calcio dando lugar al carbonato de calcio lo que hace disminuir el pH del medio que rodea al acero de refuerzo a valores próximos a 9. La profundidad de penetración del CO₂ es función, no solo del tiempo, sino también de la porosidad del hormigón (Bas, 2008).

1.3.2 Penetración de iones cloruro

La presencia de los iones cloruro en el hormigón puede deberse a su propia elaboración o por el entorno al que este se exponga. Al referirse a su elaboración los iones cloruro pueden encontrarse en aditivos como aceleradores de fraguado o reductores de agua que pueden contener estos iones. Además se pueden encontrar iones de cloruros en los áridos, cementos y adiciones con los que se prepara la mezcla. En el caso de su entorno se refiere al ambiente salino natural o provocado como el medio marino o sales de deshielo.

La presencia de iones cloruro acelera el proceso de corrosión del acero de refuerzo en el hormigón. Cuando las concentraciones de cloruro son mayores de 0,2 en masa de cemento pueden destruir la capa protectora de la superficie del acero, incluso para valores de pH mayores de 11,5 (Bas, 2008).

1.4 Emisión de CO₂ y otros contaminantes

El cemento se ha convertido en el material de construcción del tipo aglutinante más empleado a nivel mundial. A pesar de que en el contexto moderno la producción unitaria de cemento no clasifica entre las actividades industriales más contaminantes, es precisamente debido a su alta demanda que la industria cementera ha devenido en un contaminante global de elevada relevancia. En este contexto Macphee y Martirena (Macphee D. G., 2010; Martirena, 2011) explican que según estimados la producción de cemento a nivel mundial es la responsable del 5 al 7 % de la emisión de CO₂ y del 7 % del consumo de energía en el sector industrial, lo cual sin lugar a dudas convierte a esta industria en una de las que más contaminación produce a nivel global. Los aspectos ambientales más importantes de la fabricación de cemento son el consumo

energético (son necesarios 2900 MJ de energía térmica y 100 kWh de energía eléctrica para producir una tonelada de cemento Portland) y la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, hexafluoruro de azufre, hidro/perfluorcarbonos y dióxido de carbono) (Cociña, Frías and Tabalero, 2011).

Actualmente en el mundo, la producción de cemento es de aproximadamente 13000 t por año, esto es cerca de 2 t por persona al año. Se estima que la demanda de cemento aumente en a 16000 t por año para el 2050. Mientras tanto, la industria del cemento es una de las de mayor consumo de recursos naturales y combustibles fósiles no renovables, cerca de 11400 t por año (Zhang *et al.*, 2018). Por esta razón, es de vital importancia minimizar la contaminación producida por la industria cementicia. Muchas investigaciones se centran en la utilización de materiales puzolánicos que disminuyen la emisión de CO₂ proveniente de la quema de *Clinker*, además muchos materiales puzolánicos provienen de desechos industriales sin usos apreciables en la sociedad. (Hernández-Ruiz *et al.*, 2017).

1.5 Adiciones reactivas

Una puzolana es un material, natural o artificial, que contiene fundamentalmente silicio o silicio y aluminio (el conjunto sílice más alúmina varía a menudo entre el 70 y el 80 %), esto les da un carácter ácido y, por tanto, una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente). Además, la puzolana está compuesta de fase vítrea en su mayor parte, lo que hace que sean materiales de alta reactividad (Sánchez, 2014).

La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño. Sin embargo, finamente molida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido cálcico (activador) a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en el agua y que poseen características cementantes, es decir, capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico.

Como se enunció antes, las puzolanas por si solas no son un material cementante. Sin embargo, cuando se usan en combinación con el cemento portland la situación es totalmente diferente, pues el cemento durante el proceso de hidratación produce hidróxido de calcio, el cual reacciona con los aluminosilicatos presentes en la puzolana para formar compuestos cementantes.



donde C-S-H: silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida.

Por su parte la reacción de hidratación del cemento puede representarse por:



Las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas se derivan principalmente de tres características de la reacción puzolánica. En primer lugar, la reacción puzolánica es por términos generales una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación del calor y el desarrollo de la resistencia serán procesos más lentos. En segundo lugar, como se dijo antes, la reacción puzolánica consume hidróxido de calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos. En tercer lugar, la reacción puzolánica al ser más lenta que la reacción de hidratación del cemento y producirse en un tiempo posterior, los productos de reacción rellenan, de forma muy eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento. Así, se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánicas del sistema (menor porosidad).

Los materiales puzolánicos o adiciones activas de mayor interés en la industria del cemento pueden dividirse en dos grandes grupos: naturales y artificiales. Al primer grupo pertenecen las verdaderas puzolanas y las tobas volcánicas, así como una serie de otros productos naturales, que tienen en común un comportamiento similar frente a la cal. En el segundo grupo están principalmente las escorias de horno alto, las cenizas volantes y las arcillas calcinadas.

Las puzolanas naturales son productos sialíticos, debiendo este nombre al alto contenido en silicio y aluminio que tienen.

Todas las puzolanas naturales (calcinadas o no) y algunos subproductos industriales como las cenizas volantes de bajo contenido en calcio se adaptan a la definición dada de puzolana. Sin embargo, algunos materiales de adición, por ejemplo cenizas volantes silicocálcicas y escorias, tienen un elevado contenido en óxido de calcio (desde el 10 % hasta el 40 %). Si parte de dicho calcio está disponible para la reacción puzolánica, el material llega a tener propiedades cementantes por sí mismo. Cuando esto ocurre, el material no debe de ser considerado simplemente como una puzolana en el sentido que se le ha dado a este término, sino que es más apropiado denominarlo puzolánico - cementante.

La reactividad de un material puzolánico se basa en el aspecto químico de la fijación de la cal. El aspecto mecánico del fenómeno se traduce en un aumento de la resistencia mecánica. La actividad puzolánica depende de varios factores:

- Composición química y mineralógica (fase vítrea y cristalizada).
- Estado de división (distribución granulométrica).
- Estructura y estado de la superficie.

La actividad puzolánica en los cementos se explica por un ataque lento de la sílice y de la alúmina (en disolución) de las puzolanas, por parte de la portlandita (CH) formada “*in situ*” cuando se hidratan los componentes del *Clinker* (Fundamentalmente los silicatos de calcio). El cemento reacciona primeramente con el agua liberando la portlandita [Reacción (1.7)], que activa la puzolana [Reacción (1.6)]. Hay a continuación una recristalización con formación de silicatos de cal hidratados (C-S-H) y de aluminatos de cal hidratados (C_4AH_{13} , AF_t y AF_m), compuestos que tienen propiedades cementantes.

Todos los materiales llamados puzolanas no poseen forzosamente propiedades puzolánicas. Se puede entonces, en ciertos casos, activar a estos materiales empleando diferentes métodos, a saber:

1. Adición de productos químicos (activación química).
2. Molienda a una finura más elevada (activación mecánica).
3. Tratamiento térmico (activación térmica).

El segundo procedimiento además de aumentar la finura trae también consigo un cierto incremento del desorden de la estructura cristalina.

A menudo es económicamente viable tratar térmicamente las puzolanas a fin de crear un estado de desorden de la estructura cristalina por deshidroxilación y poder así activarlas. La temperatura de tratamiento está comprendida entre 600 y 800 °C. Para cada puzolana, existen condiciones de tratamiento óptimas ligadas a la temperatura, la duración del tratamiento y a la velocidad de enfriamiento.

Se pueden adicionar puzolanas al *Clinker*, al yeso y a otros constituyentes secundarios, con el fin de obtener los cementos con adiciones.

Las puzolanas molidas pueden ser adicionadas con el fin de mejorar las propiedades de los hormigones, ya sea en estado fresco y endurecido. En estado fresco, las puzolanas mejoran la laborabilidad, la plasticidad y la retención de agua. En estado endurecido, las puzolanas mejoran la resistencia a las aguas agresivas y permiten una fijación progresiva de los álcalis del cemento.

1.5.1 Adiciones reactivas más utilizadas

Como se explicó en el epígrafe 1.4, la producción del cemento es un contaminante medioambiental, fundamentalmente por las emisiones de CO₂ y el alto consumo energético durante su producción, lo cual además se ve agravado por la alta demanda de este producto en la industria de la construcción. Al mismo tiempo, se ha demostrado (Adesanya and Raheem, 2010; Somna *et al.*, 2012) que la sustitución de determinados porcentajes de cemento por puzolana puede reducir el consumo de cemento, y con ello mitigar el impacto medioambiental que ocasiona la producción cementera. Además, el beneficio que se proporciona al disminuir el impacto medioambiental, no solo está relacionado con este hecho, sino que muchas de las puzolanas conocidas, ellas mismas o los productos a partir de los cual se obtienen constituyen un problema para el medio ambiente. De este modo, para contrarrestar estos efectos desfavorables de la producción de cemento se realiza la sustitución de este por porciones de puzolanas, lo cual no solo contribuye a la reducción del impacto medioambiental, sino que posibilita la obtención de un hormigón más duradero, sobre todo en las condiciones de climas agresivos, pues se ha demostrado que las puzolanas pueden mejorar las características del material.

1.5.1.1 El humo de sílice (HS)

El humo de sílice es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura entre 0,01 - 1 µm, que se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metálico y ferro-silicio en hornos de arco eléctricos.

La utilización del humo de sílice en sustitución de una parte del cemento aumenta el refinamiento de los poros del hormigón, mejora su rigidez y la resistencia a la penetración de iones sulfato (Rodier *et al.*, 2019).

Hasta el momento el humo de sílice está reconocido, con mucho, como la puzolana de mejores propiedades, por lo que, cualquier estudio que se realiza de un material puzolánico, debe ser comparado con esta puzolana que se ha convertido en un patrón de referencia ya que aumenta el refinamiento de los poros; mejora la fuerza a temprana edad, proporciona mejor comportamiento frente a la reacción agregada alcalina y mejora la resistencia al sulfato. (Rodier *et al.*, 2019).

Vale destacar que este residuo industrial es muy costoso por ejemplo en Europa su costo oscila entre 0,25 a 0,50 EUR/kg, lo que limita su aplicación en la industria, especialmente en los países subdesarrollados (Rodier *et al.*, 2019).

1.5.1.2 Cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBC)

El bagazo de caña de azúcar (CBC) es un residuo agroindustrial procedente de la industria azucarera, que después de recibir tratamiento térmico obtiene propiedades puzolánicas. Las cantidades de bagazo que se genera en la producción de azúcar son considerables. Cuando este bagazo se utiliza para la producción de electricidad, incinerándolo en la caldera de un turbogenerador, la ceniza resultante constituye una amenaza al medio ambiente, ya que, en muchas ocasiones, se coloca en vertederos sin ningún otro uso.

De acuerdo con Lefran Torres (Torres, 2017), las cenizas de bagazo de caña de azúcar pueden sustituir parcialmente el *Clinker* hasta un 30 %, siendo el remplazo del 20 % la proporción óptima para obtener un concreto con mayor resistencia a la compresión y una menor permeabilidad al agua que el concreto con 100 % de cemento *Portland*.

1.5.1.3 Ceniza de cáscara de arroz (CCA)

La cáscara de arroz (CCA) es la parte de la planta de arroz que cubre el grano, esta contiene una alta concentración de sílice, generalmente entre 80 - 85 %. Se conoce que internacionalmente se producen millones de toneladas por año de CCA, sobre todo en los países altamente productores de arroz. En muchos casos la CCA o sus cenizas se convierten en desechos agrícolas no deseado. Se ha reportado que la CCA calcinada bajo condiciones controladas en el rango de 550 – 700 °C produce sílice en estado amorfo con una alta reactividad (James and M, 1986; Chandrasekhar *et al.*, 2003). La CCA se ha usado en las mezclas cal-puzolana y se puede utilizar convenientemente para sustituir parcialmente el cemento *Portland* (Sata, Jatarapitakkul and Kiattikomol, 2007).

Según Apriante y colaboradores (Aprianti *et al.*, 2015) la CCA puede contener hasta un 90 % de sílice amorfa. Sensale (Sensale, 2010) explica que en el caso de esta ceniza, su efecto químico se relaciona al hecho que cuando se produce una combustión controlada se convierte en un material puzolánico que al combinarse con el hidróxido de calcio forma secundariamente C-S-H, mientras que, el efecto físico está ligado al tamaño de partícula (menos de 45 µm en término medio), que produce un refinamiento en la estructura del poro, actuando como punto de nucleación para productos de hidratación que restringe el crecimiento de cristales generados en el proceso de hidratación.

1.5.1.4 Residuos de cenizas de mazorca de maíz (CMM)

El maíz es una de las plantas que más residuos genera, a saber: el tallo, el follaje u hojas, la paja de la mazorca y la tuza de la mazorca (en lo adelante mazorca). Adesanya y Raheem (2010)

(Adesanya and Raheem, 2010) estudiaron las puzolanas de cenizas de mazorca de maíz (CMM) mezcladas con cemento. Estudios previos de estos mismos autores determinaron que la CMM tiene un contenido de SiO_2 superior al 65 % y una combinación de óxidos de Al_2O_3 y Al_2O_3 entre 70 – 75 %. Según Aprianti y colaboradores (Aprianti *et al.*, 2015) en un remplazo entre el 20 y el 25 % de CMM en sustitución del cemento produce mejoras en las propiedades de la composición de la mezcla en relación al cemento sin adición.

1.5.1.5 Zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados, compuestos por tetraedros de $(\text{SiO})_4$ y $(\text{AlO})_4$ enlazados espacialmente de tal forma que a cada átomo de oxígeno corresponden dos tetraedros de aluminio, pero sin que éstos sean vecinos cercanos. La carga negativa del enrejado aniónico de Al - O - Si se compensa con los cationes intercambiables de Na, K, Mg y Ca entre otros (Roque Malherbe, 1988). Las zeolitas naturales son bien conocidas por su capacidad para ganar y perder agua en más del 30 % de su peso seco, y porque sus cationes constituyentes se pueden intercambiar sin cambios importantes en su estructura cristalina (Autié Perez, 1999).

Las zeolitas naturales son conocidas por su capacidad como adsorbentes, pero también son populares por su empleo en algunas regiones del mundo como puzolanas. Es bien conocida por su capacidad de perder y ganar agua en más del 30 % de su peso seco, por otro lado, sus cationes constituyentes se pueden intercambiar sin cambios importantes en la estructura cristalina.

Se ha comprobado que la zeolita natural es un buen material para adicionar al cemento (Frías *et al.*, 2012) debido a que los óxidos de aluminio (Al_2O_3) y silicio (SiO_2) presentes en su estructura se combinan químicamente con el hidróxido de calcio, producido por la hidratación del cemento, para así formar el S-C-H, gel, y aluminatos, lo que resulta en la mejora de la micro estructura del cemento endurecido.

Otras investigaciones han demostrado que, con el nivel de sustitución de 10 % de zeolita se comporta mejor que la ceniza de combustible pulverizado, pero es inferior al humo de sílice en términos de aumento de la resistencia a la compresión, la disminución de la absorción inicial de la superficie y la difusión de iones cloruro en el hormigón (Ahmadi and Shekarchi, 2010).

1.5.1.6 Cenizas de combustible de aceite de palma (CAP)

El aceite de palma proviene del árbol de la Palma que se cultiva fácilmente en países tropicales como Malaysia, Indonesia, Thailandia, África y algunos de América Latina. La ceniza de

combustible de aceite de palma (CAP) es un producto de desecho obtenido en forma de ceniza a través de la quema de desechos sólidos, como la cáscara o fibra de aceite de palma y la cáscara de almendra de palma.

El óxido principal de CAP es dióxido de silicio (SiO_2). Se ha explicado que los CAP son moderadamente ricos en contenido de sílice (59,6 – 66,9 %) en comparación con el CPO. Además, la cantidad de contenido de hierro (1,9 – 5,7 %) es similar a la de CaO, que es muy bajo, es decir, alrededor del 5 %. Sin embargo, es mucho más fino que el CPO y su gravedad específica es de alrededor de 1,9 - 2,4. La diferencia en la cantidad de componentes químicos en CAP se debe a la fuente del material y al proceso.

Los CAP de alta finura tienen una reacción puzolánica más rápida que los CAP gruesos (sin tamizar). Por lo tanto, las cenizas de CAP pueden mejorar la resistencia a la compresión del hormigón debido a su alta finura, que es más densa y más homogénea. Además, el uso de CAP como aglutinante satisface los requisitos químicos como material puzolánico al tener una pérdida por ignición (PPI) de menos del 10 %. La resistencia a la compresión del mortero debido a la reacción puzolánica de la CAP es pequeña a edades tempranas pero incrementa significativamente a edades tardías de 0.1 MPa a 4,5 MPa en 7 días y de 2.5 MPa a 22,5 MPa en 90 días (Aprianti *et al.*, 2015).

1.6 Caracterización de la ceniza de Bambú

Este residuo es relativamente nuevo en la industria de la construcción y solo pocos estudios han conducido al uso de la hoja de bambú en las mezclas de concreto. La composición química de la CHBC fue estudiada por primera vez en 2011 por Cociña y colaboradores (Villar-Cociña *et al.*, 2011; Aprianti *et al.*, 2015).

Por tanto, la ceniza de hoja de bambú constituye un buen remplazo para el cemento para el caso de los países subdesarrollados debido al alto costo que tiene el humo de sílice en el mercado la cual es considerada como la mejor puzolana del mundo, ya que las propiedades de la ceniza de hoja de bambú son muy similares a esta puzolana (Rodier *et al.*, 2019).

1.6.1 Composición química y mineralógica de las cenizas de Bambú

La planta de Bambú absorbe el ácido silicio del suelo y lo deposita en forma amorfa en todas las partes de la planta, como el tallo y las hojas. En las cenizas de hojas de Bambú (CHBC), el componente principal es la sílice con un porcentaje por encima del 70 %, seguida de CaO, K_2O ,

SO₃, MgO y P₂O₅ en porcentajes por debajo del 7 %. Otros óxidos como Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O y Cl muestran contenidos por debajo del 1 % (Cociña, Rodier and Lefran, 2018).

Tabla 1.3: Composición química de ceniza de hoja de Bambú calcinada a 600 °C.

Comp. Qca.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	PPI*
CHCB 600 °C	73.9	0.13	0.11	3.53	0.43	2.01	4.23	0.58	6.29	4.51	4.14

*PPI: Pérdida por ignición

En el patrón de XRD de la ceniza de Bambú se puede observar su naturaleza prácticamente amorfa en la banda ancha entre 150 y 400 (2θ), aunque existen algunos picos que corresponden a fases cristalinas (Figura 1.1). La banda formada por la ceniza de Bambú es similar a las formadas por otros residuos agroindustriales como la ceniza de cáscara de arroz y la ceniza de caña de azúcar (Cociña, Rodier and Lefran, 2018).

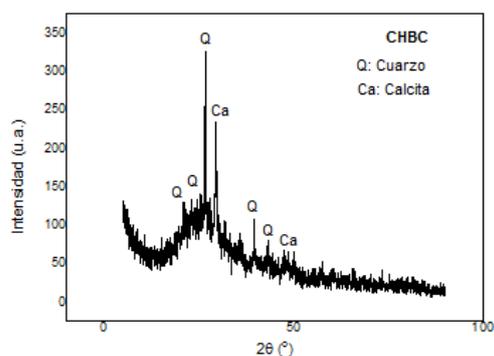


Figura 1.1: Patrón de XRD de la ceniza de hojas de bambú a 600 °C.

1.6.2 Actividad puzolánica de la ceniza de Bambú: Evaluación cualitativa.

En la figura 1.2 se observa la microscopía electrónica después de ocurrido el proceso de hidratación en el cemento, el cual produce hidróxido de calcio (CH) y este reacciona con los aluminosilicatos presentes en la CHBC dando lugar a la formación de los geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H). (Cociña, Rodier and Lefran, 2018).

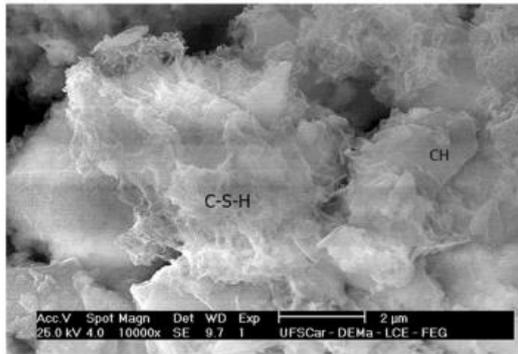


Figura 1.2 Microscopía electrónica de la ceniza de hoja de bambú calcinada a 600 °C.

En la figura 1.3 se muestra la variación de la conductividad con el tiempo de reacción (h) para la suspensión puzolana/ hidróxido de calcio para las cenizas de Bambú a 600 °C.

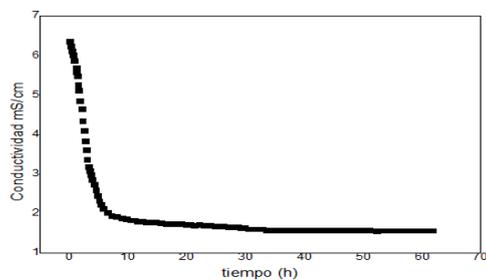


Figura 1.3: Variación de la conductividad con el tiempo de reacción para la CHBC a 600 °C.

En el ensayo se obtiene un decrecimiento de la conductividad eléctrica del sistema puzolana/ CH. Esta disminución de la conductividad es solo atribuido a la reacción puzolánica entre la sílice amorfa y el CH dando geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H), con el correspondiente decrecimiento de la concentración del CH en la solución. Como resultado de esta actividad puzolánica, se obtiene una considerable variación (pérdida) de la conductividad en edades tempranas. La estabilización de la curva se obtiene para grandes períodos de tiempo. Esto indica el momento en el que prácticamente la reacción ha terminado. (Cociña, Rodier and Lefran, 2018)

1.7 Formulación del problema de absorción de agua en concretos armados.

Modelo capilar - difusivo

El modelo matemático que aquí se emplea fue tomado de una publicación científica realizada por el profesor Ernesto Villar Cociña y otros investigadores en el año 2005 . Con este modelo describieron el proceso de absorción de agua en hormigones con aditivos puzolánicos como un proceso compuesto por la absorción de agua en los grandes poros capilares y difusión a

través de los pequeños poros de material. Este modelo no solo permite calcular los parámetros cinéticos a edades tempranas sino también a edades superiores. De esta manera se tiene una descripción cuantitativa de los procesos de absorción y una caracterización más completa del material. (E. Villar-Cociña , E. Valencia-Morales, 2005)

La elaboración del modelo partió de la siguiente propuesta:

El proceso de transporte de agua en el hormigón ha sido explicado en la mayoría de los casos para edades tempranas. En muestras secas y sin adiciones, considerando que la superficie de un mortero u hormigón es expuesta al agua, la absorción de agua (normalizada al área de la superficie expuesta) M/A (en kg/m^2) es proporcional durante el período inicial de absorción a la raíz cuadrada del tiempo t de exposición al agua:(Hall and Kam Min Tse, 1986) o sea:

$$\frac{M}{A} = S t^{1/2}, \quad (1.8)$$

Donde S es el coeficiente de absorción capilar medido en $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$. Este es fácilmente determinado de la pendiente de la parte lineal de la curva $\frac{M}{A}$ vs. $t^{1/2}$. Sin embargo al transcurrir el tiempo la velocidad inicial de ingreso decrece, ya que el agua ha accedido a todos los grandes poros capilares. La disminución en el gradiente de la parte casi lineal recta de la absorción de agua frente a la raíz cuadrada del tiempo indica que la absorción está ocurriendo ahora a través de los poros más finos e indica la creciente importancia de los pequeños poros con el tiempo (Martys and Ferraris, 1997). Además, algunos materiales con muy gruesa estructura de poros pueden experimentar poca succión capilar y mostrar una desviación significativa de la linealidad después del proceso prolongado de exposición al agua. Es ampliamente conocido que en morteros u hormigones secos o parcialmente secos, el mecanismo predominante en la absorción de agua es la succión capilar a través de los poros capilares y cuando transcurre el tiempo, y el material comienza a ser saturado, el mecanismo predominante es la difusión a través de los poros más pequeños y poros de gel (Xi, Y., Z. P. and L. Jennings, 1994; Martys and Ferraris, 1997). Sin embargo, ambos procesos deberían coexistir simultáneamente desde edades tempranas (un proceso capilar a través de los grandes poros capilares y un proceso de difusión a través de los poros pequeños y poros de gel), principalmente en hormigones adicionados con puzolanas donde la cantidad de poros del gel aumenta y los grandes poros capilares disminuyen considerablemente. Para modelar

los procesos capilar y difusivo tenemos en cuenta que la absorción de agua acumulada con el tiempo puede expresarse en general como:

$$\frac{M}{A} = S t^{1/2} + \text{término difusivo}, \quad (1.9)$$

donde:

M : masa de agua absorbida,

A : área de la muestra,

S : coeficiente de sorptividad y

t : tiempo.

El primer término de la Ec. (1.9) puede escribirse como (Martys, 1997b):

$$N\rho \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{St^{1/2}}{N\rho}\right) \right\}, \quad (1.10)$$

donde:

N : constante relacionada con la distancia desde la superficie del hormigón sobre la cual los poros capilares controlan el proceso inicial de absorción de agua y

ρ : densidad del agua.

Este término fue construido tal que para edades tempranas en el límite, cuando $t^{1/2} < N\frac{\rho}{S}$, la expansión de la exponencial (1.10) se reduce a la expresión (1.8). El término difusivo en la ecuación (1.9) se obtiene teniendo en cuenta la difusión física de agua y la solución de la ecuación de continuidad o Segunda Ley de Fick, en estados no estacionarios con las condiciones iniciales y de contorno impuestas por la situación dada. Las muestras son morteros cilíndricos permeables con agua cero (considerando el agua utilizada en el ensayo) como condición inicial. En nuestro caso (como se mencionó anteriormente) todas las caras fueron selladas excepto la superficie en contacto con el agua. Esta geometría simplifica el problema matemático para determinar el coeficiente de difusión, que no depende de la geometría y condiciones de contorno. El coeficiente de difusión (D) es más probable que sea gobernado por la naturaleza de la sustancia y las características del hormigón. En consecuencia, el problema de difusión se reduce a un tratamiento unidireccional donde el

coeficiente de difusión D se supone constante. De este modo, el problema matemático está dado por la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.11)$$

donde:

C : concentración de agua,

t : tiempo y

D : coeficiente de difusión

En correspondencia con las condiciones a que están sometidas las probetas en el ensayo de humectación, las condiciones iniciales y de frontera están dadas por:

$$C(x, 0) = 0, \quad \forall x \in (0, L) \quad (1.12)$$

$$C(0, t) = C_0, \quad \forall t \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad x = L, \quad \forall t \quad (1.14)$$

La condición límite (1.13) muestra la invariancia de la concentración de agua (C_0) en la superficie para cada muestra. La condición límite (1.14) expresa la impermeabilidad en el tope de la muestra en $x = L$. Utilizando el método de la transformada de Laplace se resuelve el problema de frontera y se obtiene:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 Dt \right] \sin \left(\frac{2n+1}{2L} \right) \pi x. \quad (1.15)$$

Esta solución expresa los perfiles de concentración de agua a lo largo de la coordenada x y el tiempo t en toda la sección de la muestra. La cantidad de agua absorbida a través del área de la superficie permeable es:

$$M = \iiint C(x, t) dx dy dz = A \int_0^L C(x, t) dx \quad (1.16)$$

$$M = AC_0 L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 Dt \right] \right\}. \quad (1.17)$$

Por consiguiente la cantidad de agua absorbida por unidad de área expresada en kg/m^2 es:

$$\frac{M}{A} = C_0 L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t \right] \right\}. \quad (1.18)$$

Sustituyendo la ecuación (1.18) en el segundo término de la ecuación (1.9) se obtiene:

$$\frac{M}{A} = N\rho \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{St^{1/2}}{N\rho} \right) \right\} + C_0 L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t \right] \right\} \quad (1.19)$$

Esta ecuación (1.19) representa el modelo capilar-difusivo. Este modelo expresa la cantidad de masa de agua absorbida por unidad de área incorporada a la muestra considerando tanto la absorción capilar a través de los grandes poros (1er término) y la difusión de agua a través de los pequeños poros y de los poros muy finos de gel (2do término) (E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, 2005).

Capítulo 2: Materiales y Métodos

2.1 Materiales empleados en la elaboración de las probetas

2.1.1 Cenizas de residuos de Bambú

En el estudio se empleó como puzolana la ceniza de hoja de bambú. El bambú utilizado fue el *Bambusa vulgaris*, cultivado de manera silvestre en la zona los alrededores del campus de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Villa Clara, Cuba.

Una vez recolectadas las hojas fueron secadas al sol y a temperatura ambiente durante 14 días. Después del secado de las hojas de bambú, se procedió a la pre incineración de las mismas, la que se realizó en ambiente abierto. Se tomaron las medidas pertinentes para evitar la contaminación de la ceniza de pre quema, la cual fue recolectada y almacenada en un recipiente de porcelana. Posteriormente la ceniza obtenida de la pre quema se incineró en un horno Nabertherm P 300. El tiempo total de la incineración fue de dos horas. Durante la primera hora a una temperatura de 400 °C y en la segunda a 600 °C. Las cenizas se molieron en un molino de bola y se pasaron por un tamiz de 90 µm.

2.1.2 Cemento Portland

Se utilizó el cemento P-35 proveniente de la fábrica Carlos Marx, Cienfuegos.

Tabla 2.1 Propiedades físicas y mecánicas del cementos P-35.

Tipo de cemento	Finura (%)	Consistencia Normal (%)	Tiempo de fraguado		Resistencia mecánica (MPa)	
			Inicial(min)	Final(horas)	7 días	28 días
P-35	2.7	24.6	105	2.8	35.3	50.4

2.1.3 Árido y agua

Los áridos o agregados son materiales minerales procedentes de rocas desintegradas en estado natural o precisa de trituración mediante procesos industriales. Se pueden encontrar en diversos lugares y en distintas formas siendo estos dos factores de gran importancia pues de ellos dependen la docilidad del hormigón fresco, la resistencia del hormigón endurecido, la durabilidad de la estructura y la economía de las mezclas (Ulloa, 2018).

El árido utilizado provino de la planta de extracción El Purio, ubicada en el municipio de Encrucijada, Santa Clara, el cual cumple con la norma cubana NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos-Requisitos (NC 251: 2013, 2013).

Tabla 2.2. Resultados de los ensayos.

Ensayos	Resultado	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2.3	≤ 5.0 %
Partículas de Arcillas (%)	0	≤ 1.0 %
Pesos Específicos Corriente	2.56	≤ 2.50
Pesos Específicos Saturado	2.61	
Pesos Específicos Aparente	2.7	
Absorción (%)	2.27	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1495.5321	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1626.7255	
Porcentaje de Huecos (%)	36.33	
Módulo de Finura	3.27	2.20 – 3.58

Tabla 2.3 Análisis granulométrico.

	Tamiz N°										
	25.0	19.0	12.5	9.50	4.75	2.36	1.18	600	300	150	74
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	μm	μm	μm	μm
% Pasado				100	100	71	50	27	15	3	
NC 251:2013				100	90- 100	70- 100	45- 80	25- 60	10- 30	2-10	

No por simple o relativamente fácil de adquirir deja de ser el agua un material importante en la elaboración del concreto sino, que juega un papel muy importante en este proceso. Este preciado líquido es el responsable de dos procesos en la mezcla; uno es la hidratación del cemento, haciendo posible la formación de muchos compuestos y fases en el hormigón y otra, la laborabilidad de la mezcla siendo determinante para definir su fluidez (Ulloa, 2018).

En este caso se utilizó agua potable como especifica la norma NC 353:2004 “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros – Especificaciones” (NC 353: 2004, 2004).

2.2 Elaboración de las probetas

Se fabricaron probetas cilíndricas de altura 4.5 cm y diámetro 3.6 cm en las cuales se sustituyó en peso el cemento P-35 con ceniza de hoja de bambú en un 0 %, 10 %, 15 % y 20 % respectivamente. (Tabla 2.4).

Se amasó el cemento con agua, después se agregó la ceniza de bambú y por último el árido en las proporciones que se muestran en la tabla 2.4 para cada una de las probetas construidas. Se agregó en tres porciones a cada uno de los moldes de cilindro y luego se compactó manualmente con una varilla fina.

En la figura 2.1 se muestra el proceso de amasado que se empleó en la elaboración de las probetas.



Figura 2.1 Proceso de amasado del cemento con los aditivos.

Tabla 2.4 Composición de los diferentes tipos de probetas fabricadas.

Probetas	Sustitución con CHBC (%)	Cemento (g)	Bambú (g)	Árido (g)	Agua (ml)
Patrón	0	150	0	450	75
1	10	135	15	450	75
2	15	127.5	22.5	450	75
3	20	120	30	450	75

Se tomó una probeta cilíndrica de 4.5 cm de altura por 3.6 cm de diámetro que fue curada como mínimo 28 días, pre acondicionada a equilibrio de humedad constante. Este equilibrio se logró con un secado a 60 °C en una estufa ventilada por aproximadamente 48 horas (hasta peso constante y posterior enfriamiento en un desecador). La superficie de succión de la muestra es la parte lisa, esta debe estar libre de carbonatación y otras impurezas. Se cubrieron previamente las áreas laterales curvas de las probetas con silicona.

2.3 Ensayo de absorción de agua por capilaridad

Las probetas ya pre acondicionadas se colocaron sobre los extremos de unos cintillos de madera, (Figura 2.2), dentro de un recipiente con agua a una altura aproximada de 5 mm por encima de los cintillos. Para mantener el nivel del agua en el recipiente se llenó un recipiente de agua y se colocó en posición invertida, de manera tal que el mismo quedó introducido en el agua (Figura 2.2).

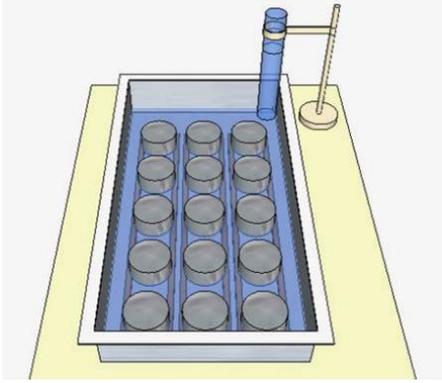


Figura 2.2 Disposición de cada una de las probetas durante el ensayo de humectación.

Las probetas (Tabla 2.4) se pesaron en una balanza analítica YP5001 en los tiempos: 0; 1/12; 1/6; ¼; ½; 1; 2; 3; 4; 6; 12; 24; 36; 48; 60; 72; 84; 96 horas, contadas a partir del comienzo del ensayo. Antes de cada pesada se secaron las probetas con un paño húmedo, limpio, libre de grasas y suciedades para eliminar el agua superficial. Las condiciones ambientales del experimento fueron de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura y humedad relativa de $65\% \pm 5\%$.

Capítulo 3. Resultados y discusión

Los datos experimentales fueron extraídos a partir de resultados de los ensayos de determinación de la absorción de agua por capilaridad realizados en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Donde se obtuvieron las datas de masa de agua incorporada por unidad de área (M/A) vs. tiempo (t). Para el ajuste de estas datas experimentales de (M/A) vs. (t) se empleó el modelo capilar - difusivo (E. Villar-Cociña , E. Valencia-Morales, 2005) el cual permite la obtención de los parámetros cinéticos (coeficiente de absorción capilar y coeficiente de difusión fundamentalmente) que permiten caracterizar cuantitativamente el proceso de absorción de agua en las diferentes muestras.

3.1 Análisis cualitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que posee CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %.

En la Figura 3.1 se muestran las curvas del proceso de absorción de agua para hormigones que poseen CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %. Desde el punto de vista cualitativo se observa que a edades tempranas existe una incorporación muy rápida de agua en el concreto, pero a medida que transcurre el tiempo la misma disminuye hasta hacerse prácticamente constante. En la fase inicial la incorporación de agua ocurre a través de los grandes poros capilares que forman la microestructura de los hormigones. Con el transcurso del tiempo estos grandes poros se van rellenando y disminuyendo su tamaño. Posteriormente el proceso de absorción transcurre por los pequeños poros y poros de gel mediante mecanismos difusivos.

De acuerdo con la figura 3.1 se aprecia una mayor pendiente a edades tempranas para las muestras de CPO seguido por CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 20 % y CPO + CHBC 15 %. Dichas pendientes dan una idea del proceso a través de los grandes poros capilares y luego ocurre la difusión mediante los poros pequeños y los poros de gel. Se aprecia además que la mayor cantidad de agua incorporada a la muestra es para el CPO, seguido por CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 20 % y CPO + CHBC 15 %. Por tanto, desde el punto de vista cualitativo la muestra que incorpora menor cantidad de agua es CPO + CHBC 15 % y la que mayor cantidad de agua incorpora es la de CPO.

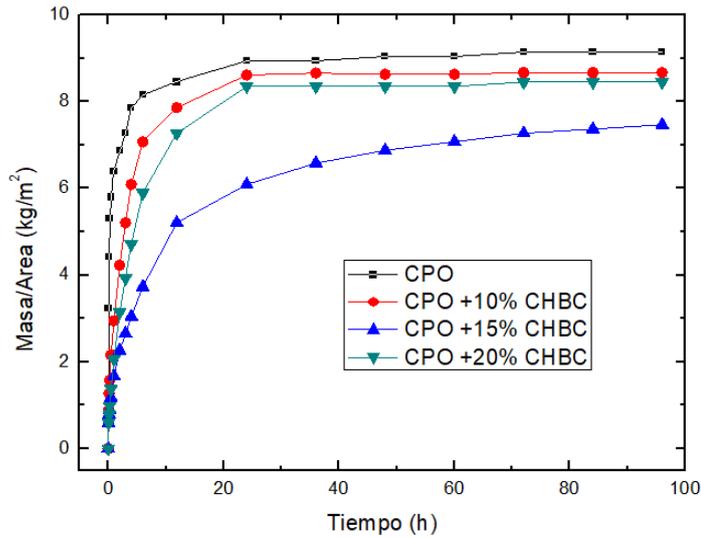
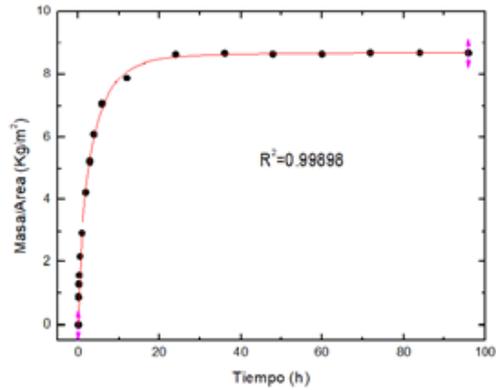
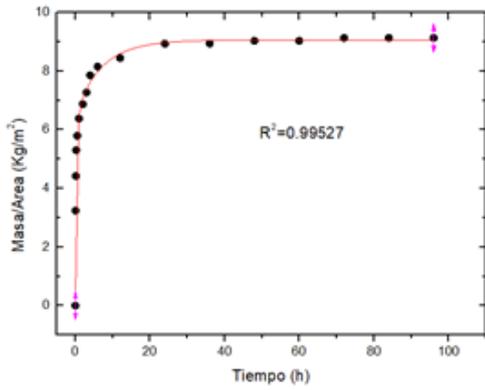


Figura 3.1. Curvas de absorción para las muestras de CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %.

3.2 Análisis cuantitativo del proceso de absorción de agua. Cálculo de los parámetros cinéticos.

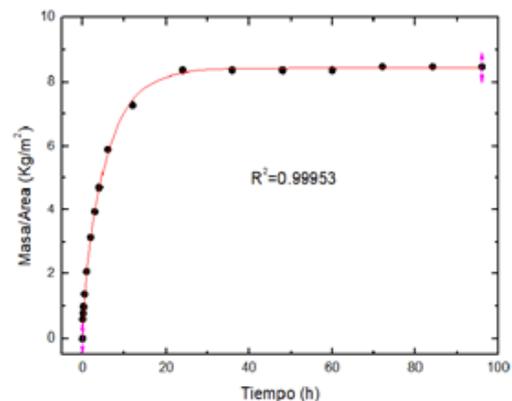
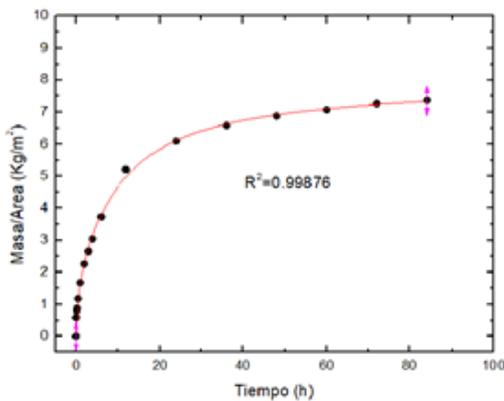
En las figura 3.2 se muestra el agua absorbida por unidad de área (M/A) vs. tiempo (t) para las muestras de CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %. La línea continua representa la curva del modelo ajustado.

Para realizar una rigurosa evaluación del proceso de ajuste del modelo a los datos experimentales se realiza un análisis exhaustivo de los parámetros estadísticos más importantes, como el coeficiente de correlación (r), el coeficiente de determinación (R^2), la suma residual de cuadrados (RSS), 95 % intervalos de confianza, la dispersión de residuales, la probabilidad de residuales y el análisis de varianza. Se puede concluir que en todas las muestras se aprecia un comportamiento capilar - difusivo, o sea, la presencia de ambos procesos en la incorporación del agua a la muestra.



a)

b)



c)

d)

Figura 3.2. Cantidad de agua absorbida por unidad de área para las muestras: a) CPO, b) CPO + CHBC 10 %, c) CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 %.

En todas las figuras se muestran los coeficientes de determinación (R^2). Durante el ajuste del modelo se tuvieron en cuenta un gran número de parámetros estadísticos tales como (r , R^2 , SE y RSS), así como análisis gráfico y análisis de variancia. En el trabajo solo hemos puesto algunos ya que de ubicarlos todos tendríamos grandes tablas que abarcarían mucho espacio.

El ajuste del modelo (Ec. (1.19)) nos permitió determinar los parámetros S , D y C_0 y N en cada caso, realizando el mismo análisis estadístico mencionado anteriormente. Los valores de los parámetros S , D , N y C_0 se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros cinéticos.

Muestra	S, kg/m ² s ^{1/2}	C ₀ , Kg/m ³	N, m	D, m ² /s
CPO	1.73. 10 ⁻² ± 0.09. 10 ⁻²	48.07 ± 2.05	6.66. 10 ⁻³ ± 0.3. 10 ⁻³	1.38. 10 ⁻⁴ ± 0.32. 10 ⁻⁵
CPO + 10 % CHBC	2.88. 10 ⁻³ ± 0.19. 10 ⁻³	92.14 ± 5.79	4.07. 10 ⁻³ ± 0.57. 10 ⁻³	2.48. 10 ⁻⁴ ± 0.25. 10 ⁻⁴
CPO + 15 % CHBC	1.66. 10 ⁻³ ± 0.10. 10 ⁻³	36.33 ± 1.92	5.99. 10 ⁻³ ± 0.57. 10 ⁻³	1.04. 10 ⁻⁴ ± 0.27. 10 ⁻⁴
CPO + 20 % CHBC	1.93. 10 ⁻³ ± 0.28. 10 ⁻³	143.93 ± 7.67	1.26. 10 ⁻³ ± 0.38. 10 ⁻³	1.69. 10 ⁻⁴ ± 0.07. 10 ⁻⁴

Acorde con los valores de los coeficientes S y D las muestras de CPO, CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 15 % y CPO + CHBC 20 % presentan un comportamiento similar pero con diferencias significativas, lo cual está acorde con el análisis cualitativo realizado previamente. La muestra de CPO es la que presenta una mayor absorción capilar S seguida por la de CPO + CHBC 10 % y la de CPO + CHBC 20 %. Estos valores de S están en correspondencia con la alta pendiente que se aprecia a edades tempranas en estos materiales Figura 3.2a, 3.2b, 3.2c. Por su parte la Figura 3.2c reflejan el agua absorbida por unidad de área (M/A) vs. tiempo (t) para la muestra CPO + CHBC 15 %, en este caso el ajuste del modelo reflejó un comportamiento también capilar-difusivo pero con un coeficiente de absorción capilar más pequeño que las demás muestras. Esto está acorde con la pequeña pendiente que se aprecia en esta curva de absorción de agua en los instantes iniciales. Esto refleja las mejores cualidades de este material puzolánico para la impermeabilidad y el aumento de la durabilidad del hormigón debido fundamentalmente a su actividad puzolánica.

En general tomando en consideración los resultados mostrados en la Tabla 3.1 podemos afirmar que el material puzolánico analizado disminuye la permeabilidad en el hormigón, lo cual es un indicador de aumento de su durabilidad. La muestra CPO + CHBC 15 % presenta menor permeabilidad y por tanto podemos afirmar que posee las mejores cualidades puzolánicas.

Los resultados obtenidos son de suma importancia ya que por primera vez se hacen estos ensayos con ceniza de hoja de bambú y se calculan los parámetros cinéticos del proceso de absorción de agua en estos materiales, no solo a nivel nacional sino además a nivel internacional. Actualmente se considera la ceniza de hoja de bambú como uno de los mejores materiales puzolánicos de residuos agrícolas (Cociña, Rodier and Lefran, 2018; Rodier *et al.*, 2019), equivalente al humo de sílice. Por lo que el estudio de la acción de este material en el hormigón con vista a aumentar su

durabilidad es de indudable valor científico y tecnológico. Futuros estudios incluirán el refinamiento del tamaño de partícula para obtener mejores resultados aún, así como la realización de ensayos tecnológicos como resistencia a la compresión, ensayos de durabilidad etc.

Conclusiones

El análisis cualitativo de la cinética de absorción permite afirmar que la mayor cantidad de agua incorporada a la muestra es para el CPO, seguido por CPO + CHBC 10 %, CPO + CHBC 20 % y CPO + CHBC 15 %. Por tanto, desde el punto de vista cualitativo la muestra que más impermeabiliza al concreto es CPO + CHBC 15 %.

El modelo capilar – difusivo planteado se ajustó a las curvas de absorción de agua, obteniéndose para las muestras de CPO, CPO + 10 %, CPO + 15 % y CPO + 20 % el coeficiente de determinación $R^2 = 0.99527$ para CPO, $R^2 = 0.99898$ para CPO + 10 %, $R^2 = 0.99876$ para CPO + 15 % y $R^2 = 0.99953$ para CPO + 20 %.

Los parámetros cinéticos calculados en el proceso de ajuste del modelo caracterizan cuantitativamente el proceso de absorción de agua en hormigones con adiciones, tanto para edades tempranas como para edades tardías y permite conocer las contribuciones de la difusión y la acción capilar en el transporte de agua en estos materiales, obteniéndose para la muestra de CPO + CHBC 15 % el menor coeficiente de absorción capilar S de $1.66 \cdot 10^{-3} \pm 0.10 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ seguido por la muestra de CPO + CHBC 20 % donde $S = 1.93 \cdot 10^{-3} \pm 0.28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$, para la muestra de CPO + CHBC 10 % $S = 2.88 \cdot 10^{-3} \pm 0.19 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ y la muestra que más agua absorbió fue la de CPO donde $S = 1.73 \cdot 10^{-2} \pm 0.09 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$.

Recomendaciones

Elevar la finura de los materiales puzolánicos, para obtener mejores resultados aun en la disminución de la permeabilidad.

Utilizar combinaciones de materiales puzolánicos (mezclas binarias) tales como: CHBC + CBC y otros residuos agrícolas en estos estudios, dada la sinergia que se produce entre los materiales, lo cual pudiera influir significativamente en la permeabilidad.

Bibliografía

- Adesanya, D. A. and Raheem, A. A. (2010) 'A study of the permeability and acid attack of corncob ash blended cements', *Constr Build Mater*, 24.
- Adrian Licor Cebey (2016) *Evaluación de la carbonatación en hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC 3*.
- Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2010) 'Cement & Concrete Composites Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Ltd, 32(2), pp. 134–141. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.006.
- Aprianti, E. *et al.* (2015) 'Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes—a review', *Constr. Build. Mater*, 74, pp. 176–187.
- Autié Perez, M. (1999) *Las zeolitas naturales cubanas como adsorbentes y separadores de vapores y gases*.
- Bas, O. I. M. (2008) *La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA.
- Chandrasekhar, S. *et al.* (2003) 'Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview', *Journal of Materials Science*, 38.
- Cociña, E. V., Rodier, L. and Lefran, M. (2018) 'Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters', *Waste and Biomass Valorization*. Springer Netherlands, 9(4), pp. 691–699. doi: 10.1007/s12649-016-9741-8.
- Cociña, V., Frías, M. and Tabalero, R. (2011) 'Adiciones activas al cemento: Inventario, caracterización y propiedades. Aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible de materiales de construcción', *Cement & Concrete Composites*, 30, pp. 50–57.
- Cruz, N. C. P. (2015) *Transporte de agua en hormigón mezclado con residuos puzolánicos. Determinación de los parámetros cinéticos del proceso*.
- E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, J. V.-L. (2005) 'Kinetics of the water absorption in GGBS-concretes : A capillary-diffusive model', *Computers and Concrete*, 2(1), pp. 19–30.

- Frías, M. *et al.* (2012) 'Cement & Concrete Composites Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes', 34, pp. 1019–1023. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.05.005.
- Hall, C. and Kam Min Tse, T. (1986) "Water movement in porous building materials VII: The sorptivity of mortars", *Bldg. Env.*, 21, pp. 113–118.
- Hernández-Ruiz, J. E. *et al.* (2017) 'Cinética de absorción de agua en hormigones mezclados con cenizas de bagazo de caña de azúcar y cáscara de arroz : Modelo', *XIV Simposio y XII Congreso de la Sociedad Cubana de Física*, pp. 1–10.
- James, J. & S. and M, R. (1986) 'Reactivity of rice husk ash', *Cement and Concrete*, 16, pp. 296–302.
- Johansen, V. K. and Taylor, W. (2002) '¿Por qué la química interés en el hormigón?', *ACI Concrete International*.
- Lin, F. and Meyer, G. (2009) 'Hydration Kinetics modeling of cement considering the curing temperatura and applied pressure', *Cement and Concret Research*, 39, pp. 255–265.
- Macphee D. G. (2010) 'Alternative Cementitious binders chemical perspectives'.
- Martirena, F. (2009) 'Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clinker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa', *Departamento de Ingeniería Civil. Santa Clara, Cuba, Universidad Central 'Marta Abreu' de Las Villas*.
- Martirena, F. (2011) 'Context of Cementitious Materials in developing countries'.
- Martys, N. S. and Ferraris, C. E. (1997) 'Capillary transport in mortars and concrete', 27(5), pp. 747–760.
- Muller, A. C. A. *et al.* (2015) 'Cement and Concrete Research Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes : New insights from 1 H NMR relaxometry', *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd, 74, pp. 116–125. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.04.005.
- NC 251: 2013 (2013) 'Áridos para hormigones hidráulicos - Requisitos', (261), pp. 830–835.
- NC 353: 2004 (2004) 'Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros -

Especificaciones', (261), pp. 830–835.

Powers, T. C. (1958) “The physical structure and engineering properties of concrete”, *Research and Development Laboratories Bulliten*, 24.

Rodier, L. *et al.* (2019) ‘Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials’, *Journal of Cleaner Production*, 231, pp. 54–63. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.208.

Roque Malherbe, R. (1988) *Física Química de las Zeolitas*, CENIC-MES.

Sánchez, A. C. (2014) *Fundamentación de los parámetros técnicos a considerar en la “Propuesta de norma cubana de especificaciones para el cemento de bajo carbono fabricado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada”*.

Sata, V., Jatarapitakkul, C. and Kiattikomol, K. (2007) ‘Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of highstrength concrete’, *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1589–1598.

Sensale, G. R. (2010) ‘Effect of rice husk ash on durability of cementitious materials’, *Cement Concr Compos*, 32.

Somna, R. *et al.* (2012) ‘Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete’, *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 36, pp. 597–603. doi: 10.1016/j.matdes.2011.11.065.

Taus, V. L. (2003) *Determinación de la absorción capilar en los hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados*, *Ciencia y Tecnología del Hormigón*.

Torres, M. A. L. (2017) *Modelo físico-matemático para la cinética de la hidratación del cemento*.

Ulloa, D. L. (2018) *Evaluación de la carbonatación en hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC3*.

Villar-Cociña, E. *et al.* (2011) ‘Cement & Concrete Composites Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash : Characterization and determination of the kinetic parameters’, 33, pp. 68–73. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.003.

Xi, Y., B., Z. P., M. and L. Jennings, H. M. (1994) ‘Moisture Diffusion in Cementitious Materials’,

Construction and Building Materials, 41, pp. 258–264.

Xu, W. *et al.* (2015) 'Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste', *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*. Elsevier Ltd, 89, pp. 90–101.
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030.

Zhang, Y. *et al.* (2018) 'Considering uncertainty in life-cycle carbon dioxide emissions of fly ash concrete', *Engineering Sustainability*.