

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
GRUPO DE FÍSICA DE LOS MATERIALES**



**Transporte de agua en hormigón mezclado con residuos
puzolánicos. Determinación de los parámetros cinéticos del
proceso**

Autor: Norma Caridad Palmero Cruz

Santa Clara, Cuba, 2015

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
GRUPO DE FÍSICA DE LOS MATERIALES**



**Transporte de agua en hormigón mezclado con residuos
puzolánicos. Determinación de los parámetros cinéticos del
proceso**

Autor: Norma Caridad Palmero Cruz

Tutor: Dr. C. Ernesto Villar Cociña

Santa Clara, Cuba, 2015

Resumen

En este trabajo se caracteriza cualitativa y cuantitativamente el proceso de absorción de agua en hormigones mezclados con residuos puzolánicos, tales como escoria siderúrgica granulada (GGBS), ceniza de bagazo de caña (CBCA) y ceniza de cáscara de arroz (CCA). Los datos experimentales de absorción de agua por unidad de área fueron extraídos a partir de resultados publicados por (Cordeiro, 2006) y (Mejia, 1997). Los parámetros cinéticos que caracterizan el proceso se obtuvieron aplicando un modelo compuesto capilar-difusivo capaz de describir el proceso de absorción de agua en todas las edades del hormigón, considerando tanto la absorción capilar a través de los grandes poros que tiene lugar mayoritariamente a edades tempranas, como la difusión a través de los poros pequeños y poros de gel que ocurre fundamentalmente a edades tardías. Con el uso del software Gráfula 3.1, fueron obtenidos los datos de masa de agua incorporada por unidad de área M/A Vs. $t^{1/2}$ a partir de las curvas de los ensayos de los autores mencionados. Para la aplicación del modelo capilar difusivo las curvas son de M/A Vs. t .

De acuerdo con los valores de los parámetros cinéticos calculados se puede afirmar que de los tres materiales puzolánicos analizados el que más disminuye la permeabilidad del hormigón es la CCA incorporado a éste un 20 %, seguido por la CCA 10 %, CCA 15 %, CBCA 20 %, CBCA 15 %, CBCA 10 %, GGBS 70 %, GGBS 60 %. El material que menos disminuye la permeabilidad es la GGBS 80 %. En el caso de los hormigones compuestos con CCA el ajuste del modelo reflejó un comportamiento difusivo puro, no apreciándose un comportamiento capilar-difusivo en los otros casos. Esto está acorde con el inexistente comportamiento supuestamente lineal a edades tempranas que se aprecia en la curva de absorción, sin que exista una pendiente a estas edades que pueda significar algo en este período de tiempo. Los resultados cuantitativos se corresponden con el análisis cualitativo realizado también en el trabajo.

Abstract

In this work it is characterized quantitatively and qualitatively the process of absorption of water in blended concretes with residuals pozzolanic, such as ground granulated blast slag (GGBS), sugar cane straw ash (SCSA) and rice husk ash (RHA). The experimental data of water absorption per unit area were extracted starting from the results published by Cordeiro (2006) and Mejías and Talero (1997).

The kinetic parameters that characterize the process is obtained by applying a hair-diffusive model compound capable of describing the process of water absorption in all ages of the concrete, considering both capillary absorption through the large pores at an early age as diffusion through the small pores and gel pores. Using the Grafula 3.1 software, data of water mass incorporated per unit area M / A Vs. $t^{1/2}$ were obtained from the curves of the tests of these authors. For the application of capillary-diffusive model the curves used are M / A Vs. t .

According with the values of the kinetic parameters calculated it can be say that of the three analyzed pozzolanic materials the rice hull ash (CCA) is the ash that more decreases the permeability when is incorporated into concrete at 20 %, followed by CCA 10 %, CCA 15 %, CBCA 20 %, CBCA 15 %, CBCA 10 %, GGBS 70 %, GGBS 60 % and finally the material that less decreases the permeability is the ground granulated blast slag (GGBS) incorporated into concrete at 80 %. In the case of concrete added with CCA the fit of the model reflect a pure diffusive behavior, not appreciating a capillary-diffusive behavior as in the previous cases. This is consistent with the nonexistent of the supposedly linear behavior at early ages, which is appreciated in the absorption curve that shows an insignificant slope at these ages. The quantitative results are consistent with the qualitative analysis carried out also in the research work. According to the results, the rice hull ash shows the best results, being an excellent pozzolanic material that diminish greatly the permeability of the concrete, causes a big pore refinement and therefore a significant increase of the durability.

Dedicatoria

A Emilio Fuentes Gort por ser la primera persona que me inculcó el amor hacia la Física. Es un orgullo para mí haber tenido un profesor tan apasionado, dedicado a su trabajo y admirado por todos sus alumnos.

A mis padres y hermano por el apoyo incondicional.

Agradecimientos

Quisiera agradecerles a todas las personas que han contribuido de una forma u otra en el desarrollo de este Trabajo de Diploma, pero principalmente a mi tutor Ernesto Villar por todos estos años de apoyo y ayuda incondicional y al profesor Jesús E. Hernández Ruíz por sus buenos consejos y sugerencias. A mi familia por estar siempre ahí y a mi novio Alexis por tanta preocupación y dedicación.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo I: Antecedentes.....	5
1.1 Fenómenos y procesos a los que está sometido el hormigón	5
1.1.1 Difusión.....	5
1.1.2 Permeabilidad.....	6
1.1.3 Durabilidad.....	8
1.1.4 Emisión de CO ₂ y otros contaminantes.....	8
1.2 Tipo de adiciones reactivas.....	9
1.3 Adiciones más utilizadas que reducen la contaminación ambiental.....	10
1.3.1 El humo de sílice.....	10
1.3.2 La escoria siderúrgica.....	11
1.3.3 Cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA)	11
1.3.4 Ceniza de cáscara de arroz (CCA)	12
1.3.5 Residuos de maíz	12
1.3.6 Residuos de bambú.....	12
1.3.7 Zeolita.....	13
1.4 Valoración de trabajos reportados en la literatura internacional acerca del empleo de adiciones en hormigones y su influencia en la permeabilidad.....	13
1.4.1 Estudio de la permeabilidad en el cemento con adiciones de cenizas de mazorca de maíz (CMM)).....	14
1.4.2 Utilización de las cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA) en el hormigón reforzado.....	14
1.4.3 Estudio de las propiedades mecánicas del hormigón con adiciones de cenizas de bagazo en un concreto de árido reciclado)	16
1.4.4 El uso de la zeolita como material puzolánico).....	17
1.5 Resultados del análisis de estos trabajos.....	18
Capítulo 2: Materiales y Métodos	20
2.1 Materiales.....	20
2.2 Métodos experimentales.....	23
2.2.1 Método para el estudio de los hormigones adicionados con cenizas ultrafinas de bagazo y de cascarilla de arroz.....	23
2.2.2 Método para el estudio de los hormigones adicionados con escoria siderúrgica (GGBS)	23

2.3 Formulación del problema de absorción de agua en concretos armados. Modelo capilar - difusivo	24
Capítulo 3: Resultados y discusión	30
3.1 Análisis cualitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que poseen adiciones de GGBS, CSBA Y RHA	30
3.2 Análisis cuantitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que poseen adiciones de GGBS, CSBA Y CCA	34
CONCLUSIONES:	40
RECOMENDACIONES.....	41
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Listado de Tablas

Tabla 1 - Composición de los concretos de resistencia convencional.	21
Tabla 2 - Propiedades de las cenizas empleadas.	22
Tabla 3 - Composición química de OPC.	22
Tabla 4 - Datos generales de las muestras GGBS.	23
Tabla 5 - Valores de los parámetros cinéticos.	39

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1 - Foto de molino vibratorio.	21
Ilustración 2 - Esquema del ensayo de absorción.	24
Ilustración 3 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de GGBS.	31
Ilustración 4 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de CBCA.	31
Ilustración 5 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de CCA.	32
Ilustración 6 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de GGBS, CBCA y CCA.	33
Ilustración 7 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones: a) 80 %, b) 70 % y c) 60 % de GGBS respectivamente.	35
Ilustración 8 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones de cenizas ultrafinas de bagazo de caña de azúcar: a) 10 %, b) 15 % y c) 20 % de CBCA.	36
Ilustración 9 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones de cenizas ultrafinas de cáscara de arroz: a) 10 %, b) 15 % y c) 20 % de CCA.	38

Listado de abreviaturas empleadas

S-C-H	Silicatos de calcio hidratados
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CPO	Cemento Portland Ordinario
PFA	Cenizas de carbón mineral
CSF	Polvo de sílice condensada
CCA	Ceniza de cáscara de arroz
CBCA	Ceniza de bagazo de caña de azúcar
CMM	Ceniza de mazorca de maíz
ZN	Zeolita natural
CON	Hormigón con agregados naturales
HS	Humo de sílice
D ₈₀	Diámetro medio de las partículas
GGBS	Escoria siderúrgica granulada
	Concretos con un 80 % de adiciones de GGBS
S80W100	sumergidas en agua y posteriormente calentadas a 100 °C
	Concretos con un 70 % de adiciones de GGBS
S70W100	sumergidas en agua y posteriormente calentadas a 100 °C
	Concretos con un 60 % de adiciones de GGBS
S60W100	sumergidas en agua y posteriormente calentadas a 100 °C

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. En los últimos tiempos ha crecido el empleo de materiales compuestos para diversos fines. Se ha tenido interés principalmente en los materiales compuestos que se utilizan en la construcción y en aquellos que se emplean como aditivos en la fabricación de cemento.

Los materiales que se emplean en la construcción están expuestos al medio ambiente. Son varias las transformaciones y deformaciones que reciben los mismos, por lo que muchas de sus propiedades se ven afectadas. El fenómeno de la corrosión, asociado con la absorción y difusión de agua, la cual sirve de vehículo para la penetración de iones cloruro en el hormigón, perjudica considerablemente la durabilidad de las estructuras del 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 resolver los investigadores del tema hoy en día.

Uno de los métodos que se utiliza para alcanzar un material mucho más fuerte y duradero es la adición de materiales reactivos en las mezclas de cemento. Muchos de estos materiales son desechos que se obtienen en la producción de otros materiales, residuos de varias industrias, desperdicios de las fabricaciones de hormigón, etcétera. Con la utilización de los mismos no solo se pretende alcanzar un concreto más óptimo, sino también se contribuye al cuidado y la preservación del medio ambiente.

Desde el punto de vista científico numerosos modelos, simples, pero precisos, describen el transporte de agua en materiales cementicios. Varios modelos (los

cuales involucran tanto modelos analíticos como numéricos) se han desarrollado para describir este fenómeno en morteros y hormigones sin y con adiciones pero, ellos no siempre concuerdan con los resultados experimentales. Muchos investigadores describen la absorción de agua en morteros y hormigones solamente a edades tempranas, donde el proceso de absorción capilar predomina. No tienen en cuenta la difusión de humedad a través de los poros más finos y poros de gel, por lo tanto no se alcanza un análisis completo. La modelación de la absorción de agua en morteros, hormigones y en general en materiales cementicios que involucren tanto los procesos difusivos como los procesos capilares y permitan el cálculo de los coeficientes cinéticos del proceso total es escasa.

Debido a todo lo expuesto, se pone de manifiesto la necesidad de profundizar en el conocimiento del transporte de agua y agentes agresivos en materiales cementicios, con el objetivo de disponer de mayor información y esclarecer algunas de las lagunas o controversias existentes actualmente sobre este importante fenómeno.

Objetivo general:

Caracterizar cuantitativa y cualitativamente el proceso de absorción de agua en hormigones mezclados con residuos puzolánicos con vistas a su utilización óptima en construcciones marítimas o en lugares de alta humedad relativa, típico de Cuba.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar cualitativamente la influencia de la adición de residuos agrícolas y naturales en el proceso de absorción de agua en hormigones para proponer aquellos con mejores posibilidades de utilización, tomando en cuenta sus propiedades y disponibilidad.

- 2- Aplicar modelos matemáticos que permitan calcular los parámetros cinéticos del proceso de absorción, tomando en cuenta la presencia de un proceso compuesto, constituido por absorción capilar a través de los grandes poros que prevalece a edades tempranas, como la difusión a través de los pequeños poros de gel que tiene lugar mayoritariamente a edades tardías.
- 3- Valorar los resultados cuantitativos obtenidos que permiten la caracterización tanto cualitativa como cuantitativa de los materiales seleccionados.

Estructura del trabajo

- Capítulo 1 Antecedentes (Descripción del proceso. Aplicación precedente de modelos matemáticos en estos materiales. Algunos resultados obtenidos).
- Capítulo 2 Materiales y Métodos
 - 2.1 Materiales. Composición química y mineralógica, morfología
 - 2.2 Métodos. Ensayos de absorción. Modelos matemáticos
- Capítulo 3 Resultados y discusión
 - 3.1 Aplicación del modelo matemático. Ajuste del modelo. Discusión de los resultados estadísticos de los ajustes
 - 3.2 Análisis de los resultados tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo
- 4. Conclusiones
- 5. Recomendaciones
- 6. Referencias bibliográficas

Capítulo I: Antecedentes

Muchos de los materiales de construcción, y particularmente el hormigón, presentan una estructura porosa y capilar. Durante su vida de servicio estos materiales están expuestos al ambiente, de modo que el transporte de humedad que puede tener lugar en ellos, juega un importante papel en el comportamiento y conservación de los mismos. Conocer y entender los fenómenos y procesos a los que está expuesto el hormigón en el medio circundante con el fin de lograr un concreto de mejores propiedades y de mayor durabilidad es un problema de actualidad.

1.1 Fenómenos y procesos a los que está sometido el hormigón

1.1.1 Difusión

Se llama difusión al fenómeno de penetración de dos o más sustancias que se encuentran en contacto. Es un proceso físico irreversible que consiste en que cada una de las componentes pasa de aquellas partes del volumen, donde la concentración es mayor, al lugar donde la concentración es menor, es decir, en dirección del decrecimiento de la 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:

$$\vec{J} = -D\vec{\nabla}C, \quad 1.1$$

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

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

Los hormigones se encuentran expuestos a diferentes condiciones climáticas. La humedad ambiental y los iones cloruros provenientes del NaCl del mar penetran a través de los poros del hormigón mediante procesos difusivos. Esto provoca la oxidación del acero que refuerza el hormigón y la corrosión del mismo. De esta manera pierde propiedades y disminuye considerablemente su durabilidad.

Se han realizados estudios y elaborado modelos matemáticos (Goual, 2000), donde se analizan la masa de agua adsorbida por unidad de área a través de los grandes poros, de los pequeños y los gel poros que conforman el hormigón con el objetivo de lograr disminuir este fenómeno y alcanzar una estructura mucho más resistente al ataque químico y disminuir la permeabilidad. La mayoría de los estudios y modelos que se aplican se circunscriben solamente a los instantes iniciales o edades tempranas del proceso de absorción, donde predomina la penetración del agua a través de los grandes poros capilares y no toman en consideración la influencia de los pequeños poros o poros de gel en el proceso.

1.1.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido que pasa a través de él es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- la porosidad del material
- la densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura
- la presión a que está sometido el fluido

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

$$k_i = C \times D^2, \quad 1.2$$

donde:

k_i : Permeabilidad intrínseca, expresada en unidades de longitud al cuadrado

C : Constante adimensional relacionada con la configuración del fluido

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

La permeabilidad real es una parte de la constante de proporcional en la Ley de Darcy, que se relaciona con las diferencias de la velocidad del fluido y sus propiedades físicas (por ejemplo, su viscosidad) en un rango de presión aplicado al promedio de porosidad. La constante de proporcionalidad específica para el agua atravesando una porosidad media es la conductividad hidráulica. La permeabilidad intrínseca es una función de la porosidad, no del fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través de él.

Es conocido que la adición de materiales reactivos como las puzolanas producen silicatos de calcio hidratados (S-C-H) en su reacción con el hidróxido de calcio que se genera en la hidratación del cemento, estos S-C-H contribuyen a densificar la microestructura del hormigón, disminuir su porosidad y aumentar la resistencia. Por lo tanto, con la adición de materiales reactivos con el cemento se puede disminuir la porosidad del hormigón y consecuentemente aumenta su durabilidad. Se sabe que si la formación de los poros es considerable puede tener una incidencia negativa en las propiedades elásticas y en la resistencia del material. Es debido a esto que el estudio de la permeabilidad de hormigones adicionados es sumamente importante porque de ello depende que se logre alcanzar un material de altas prestaciones.

1.1.3 Durabilidad

Como ya se ha mencionado, la capacidad que posee el hormigón para resistir a las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto se le conoce como durabilidad. La insuficiente durabilidad puede ser causada por el deterioro provocado por agentes externos o internos. Los factores externos se producen debido al ataque químico y daño mecánico causado por el impacto a la abrasión, cavitación o erosión. Las que tienen un carácter interno se deben a las reacciones químicas que ocurren en el hormigón debido a los componentes que lo conforman. El ataque químico del hormigón también ocurre por la descomposición de productos de hidratación y la formación de nuevos compuestos.

La durabilidad del hormigón está íntimamente relacionada con su permeabilidad. El uso de cementos compuestos que incorporan adiciones reactivas como el humo de sílice, escoria granulada, 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 (Muller, 2015, Weiting, 2015, Da Luz Garcia, 2013).

1.1.4 Emisión de CO₂ y otros contaminantes

En la producción de los materiales destinados a la construcción como la elaboración del cemento se generan una gran cantidad de gases que son vertidos a la atmósfera. Esto ocurre debido a las reacciones químicas mediante la mezcla de los productos químicos. La emisión de CO₂ ocurrida por la calcinación de CaCO₃ es una de las más significativas. Esta es la responsable del 5 % de contaminación ambiental que existe en el mundo. Vale mencionar que 1 kg de cemento producido es aproximadamente 1 kg de CO₂ emitido (Shekarchi, 2009).

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 and Talero, 2011).

También se encuentran otras emisiones como el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno, las partículas (polvo), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). El contenido de los dos últimos varía en función de las condiciones de combustión y del contenido de materia orgánica en las materias primas.

Una de las prioridades del sector cementero es la búsqueda de cementos más eco-eficientes y respetuosos con el medioambiente. Para ello, los esfuerzos se dirigen hacia la fabricación de cementos con mayores contenidos de adiciones reactivas. No sólo reduce la cantidad de cemento producido, la emisión de CO_2 , el consumo energético sino que también se logra un hormigón con propiedades más resistentes.

1.2 Tipo de adiciones reactivas

Entre las adiciones reactivas se encuentran principalmente las puzolanas que son definidas como materiales sólidos, generalmente silicatos o aluminio-silicatos, que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con (Taylor, 1997) propiedades cementantes .

Las puzolanas pueden ser empleadas en la preparación de aglomerantes hidráulicos en dos formas fundamentales: en combinación con el Cemento Portland Ordinario (CPO), formando los llamados “cementos mezclados”; y en combinación con el Hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar los llamados “aglomerantes de cal-puzolana”, con el objetivo de que reaccionen con el hidróxido de calcio originado durante la hidratación del cemento o con el que está presente en la solución de hidróxido de calcio. El resultado de esta reacción es la formación de compuestos estables e insolubles con propiedades cementicias, principalmente los hidrosilicatos de calcio de variados tipos

(conocidos genéricamente como S-C-H), y en menor medida los aluminatos de calcio hidratados (Taylor, 1997).

De acuerdo con su origen, las puzolanas pueden ser clasificadas en naturales o artificiales. Las puzolanas naturales incluyen las cenizas volcánicas, tierras de diatomeas, tobas, piedra pómez, mineral zeolítico, ópalo, lava, etc. Las puzolanas artificiales comprenden materiales que en condiciones normales no tienen propiedades puzolánicas, pero que las adquieren bajo tratamiento térmico. Entre ellas están las arcillas calcinadas, las cenizas de carbón mineral, el polvo de sílice condensado, la ceniza de cascarilla de arroz, las cenizas de bagazo y paja de caña de azúcar, las cenizas de residuos de bambú brasileño y los residuos de lodos de papel entre otros (Frias 2007, Taylor, 1997, Cociña, 2009, Cociña and Talero, 2011, Vegas, 2006).

1.3 Adiciones más utilizadas que reducen la contaminación ambiental

La sustitución de cemento por porciones de puzolanas no solo posibilita la obtención de un hormigón mucho más duradero. Esto contribuye a la reducción del impacto medioambiental ocasionado por el volumen de residuos existente en vertederos. Se preserva el consumo de recursos naturales o materias primas (tanto en la fabricación del clinker, cementos de adición, como en la sustitución de cemento en hormigones), por ejemplo, en la producción de una tonelada de cemento, aproximadamente se deben extraer 1.6 toneladas de materia primas. Se logra una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y en particular CO₂, que ha sido cuantificado por diversos expertos y asociaciones internacionales que en la fabricación de cementos y hormigones por cada tonelada de cenizas empleadas se evita la emisión de alrededor de una tonelada de CO₂ a la atmósfera. Se alcanza también un ahorro energético en el proceso de fabricación del cemento.

1.3.1 El humo de sílice

El humo de sílice, también conocido como micro-sílice o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura (en el rango de 0,01-1 µm) que se origina en la reducción del cuarzo con carbón,

durante los procesos de obtención de silicio metal y ferro-silicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas de SiO_2 amorfo en un porcentaje variable entre un 85 y un 98 %.

Vale destacar que este residuo industrial es muy costoso (una tonelada de humo de sílice equivale aproximadamente a seis toneladas de cemento), por lo que es prácticamente impensable su uso en países subdesarrollados.

1.3.2 La escoria siderúrgica

Las escorias siderúrgicas de alto horno son el resultado de la combinación de la ganga ácida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido), con la cal y la magnesia (ambos compuestos básicos) de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como fundentes.

La combinación de los óxidos ácidos (SiO_2 y Al_2O_3) y óxidos básicos (CaO y MgO), y la formación de los constituyentes de la escoria tiene lugar por fusión a alta temperatura ($\approx 1600^\circ\text{C}$), y enfriamiento del magma fluido desde 1400°C hasta temperatura ambiente.

La composición química de la escoria fundida de horno alto depende de los minerales de hierro, de las cenizas del coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. La homogeneidad de la carga, así como la regularidad en la marcha de los hornos altos, han contribuido a que las variaciones de la composición de la escoria sean mínimas.

Los principales componentes de la escoria son: CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , S, FeO , MnO , K_2O .

1.3.3 Cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA)

El bagazo de caña de azúcar (CBCA) 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, por tal razón este se aprovecha para la

producción de electricidad, incinerándolo en la caldera de un central. La ceniza resultante constituye una amenaza al medio ambiente ya que se coloca en vertederos sin ningún otro uso. Es por esto que es un material en estudio con enormes potencialidades de usarse como adición en cementos.

1.3.4 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 más de 80-85 %. Se produce en millones de toneladas por año como un material desechado de la agricultura y de procesos industriales. La CCA calcinada bajo condiciones controladas en el rango de 550 – 700 °C produce sílice en estado amorfo con una alta reactividad (James, 1986, Chandrasekhar, 2003). La CCA se ha usado en las mezclas cal-puzolana y se puede utilizar convenientemente para sustituir parcialmente el cemento Portland (Sata, 2007).

1.3.5 Residuos de maíz

El maíz es una de las plantas que más residuos genera (tallo, paja, hojas y mazorca). Adesanya y Raheem (Raheem, 2010) estudiaron las cenizas de mazorca de maíz (CMM) mezcladas con cemento. Estos autores llegaron a la conclusión de que las CMM pueden ser usadas como puzolanas. La revisión realizada de la literatura internacional arrojó escasos reportes de caracterización de este importante residuo agrícola.

1.3.6 Residuos de bambú

El bambú es probablemente la planta que tiene un crecimiento más rápido en el mundo, puede llegar a crecer hasta 50 cm en un día. Este recurso natural posee amplias posibilidades de uso como madera, fibras y pulpa. Sin embargo, el uso del bambú genera residuos no usados, como son las hojas y cáscaras. Recientes estudios (Cociña and Talero, 2011, Frias et al., 2012) realizados con cenizas de hojas de bambú han demostrado que este material es un excelente material puzolánico con una potencialidad enorme de ser usado en un futuro muy próximo.

1.3.7 Zeolita

En algunas regiones del mundo, para la industria cementera, la zeolita natural es una puzolana popular (Cociña and Talero, 2011, Frias et al., 2012). De acuerdo con estos mismos autores, la zeolita 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 debido la gran cantidad de óxidos tales como SiO_2 y Al_2O_3 que presentan los cuales 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. La sustitución de cemento por esta puzolana reduce la depresión y aumenta la demanda de agua del hormigón fresco, de alta resistencia (más de 80 MPa) y fluido (caída de 180 mm) de concreto, con la sustitución del 10 % nivel de zeolita se produce por medio de una cantidad suficiente de superplastificante (Shekarchi, 2009). El efecto de fortalecimiento del concreto por la zeolita es debido a la reducción en el contenido total de poros y mejora de la zona de estructura de transición entre la pasta de cemento mezclado con zeolita. En una serie de estudios de investigación se ha confirmado que la zeolita natural previene eficazmente la expansión perjudicial de hormigón debido a la reacción álcali sílice.

Otras investigaciones (Shekarchi, 2009) 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.

1.4 Valoración de trabajos reportados en la literatura internacional acerca del empleo de adiciones en hormigones y su influencia en la permeabilidad

Se realizó una revisión de los trabajos más importantes publicados en revistas de alto impacto para valorar, comparar y tratar de dictaminar cuáles poseen

mejores cualidades para ser usadas en el hormigón con el objetivo de reducir su permeabilidad. A continuación se muestran los más relevantes y los que más aportan a esta investigación.

1.4.1 Estudio de la permeabilidad en el cemento con adiciones de cenizas de mazorca de maíz (CMM) (Raheem, 2010).

En este trabajo se hace un estudio de la ceniza de mazorca de maíz (CMM) como material puzolánico. Se limitan a ensayos de permeabilidad y de ataque químico que presenta el hormigón en la sustitución de porcentos de Cemento Portland ordinario con adiciones de CMM de 0 - 25 % respectivamente. Este material ha demostrado ser una puzolana adecuada, pues posee una combinación de SiO_2 y Al_2O_3 de más de un 70 %.

La adición de CMM reduce la absorción de agua del hormigón. La reducción óptima se produce en el reemplazo de un 10 % de CMM.

Estos resultados dejan claro que la incorporación de la CMM en el concreto influye en su capacidad de absorción de agua. La disminución de la permeabilidad con un menor remplazo se atribuye al llenado de los poros vacíos. Sin embargo, a niveles más altos de sustituciones de CMM existe una cantidad insuficiente de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que sea capaz de reaccionar con el exceso de CMM, creándose así poros en la mezcla y por la tanto aumenta la absorción de agua.

Este artículo no cuenta con la explicación del modelo difusivo utilizado en la obtención de los resultados alcanzados para los coeficientes de absorción capilar. El transporte de agua fue evaluado solo a edades tempranas, no se tuvo en cuenta un análisis en edades superiores donde también ocurre difusión.

1.4.2 Utilización de las cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBCA) en el hormigón reforzado (Sumrerng, 2011).

En este trabajo se utiliza la ceniza de bagazo de caña (CBCA) como material puzolánico en la producción de cemento. Se realizan mezclas de concreto con sustituciones de cenizas de bagazo de 10 %, 20 % y 30 %. Se determina la porosidad, el coeficiente de absorción de agua y difusión de iones cloruros. Los resultados indican que la incorporación de CBCA hasta un 30 % aumenta la

resistencia a la penetración de los iones cloruros. Los mejores resultados a la resistencia y la baja porosidad se obtuvieron para los reemplazos de un 10 %.

La porosidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{W_a - W_d}{W_a - W_w} * 100 = p, \quad 1.3$$

donde:

p : Es la porosidad efectiva expresada en porciento

W_a : Peso de la muestra saturada expuesta al aire expresado en gramos

W_d : Peso del espécimen seco después de 24 h en el horno a 100 ± 5 °C, expresado en gramos

W_w : Peso del espécimen expuesto en el agua expresado en gramos

Los resultados reportados son el promedio de tres muestras. El coeficiente de absorción de agua es una medida de la permeabilidad al agua. El mismo se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q^2}{A} * \frac{1}{t} = C_w, \quad 1.4$$

donde:

C_w : Coeficiente de absorción de agua (m²/s)

Q : Cantidad de agua absorbida por la muestra después de secado en horno en un tiempo ($t = 60$ min)

A : Área total de la superficie de hormigón a través el cual el agua penetra (cm²)

Los mejores resultados se obtuvieron en las sustituciones de 10 % de CBCA tanto a edades tempranas en el hormigón como después de los 28 días. En los reemplazos de un 20 % y 30 % después de los 90 días, se obtienen valores mayores en los coeficientes de absorción de agua que en las muestras de cementos sin adiciones.

Es posible producir hormigón de alta resistencia con la combinación de ceniza de bagazo hasta un 30 %, pero con este porcentaje no se logra una menor absorción de agua, ya que aumenta la porosidad, incrementándose los poros pequeños.

En este trabajo se encuentran deficiencias similares a las encontradas en el artículo anterior, pues tampoco se analizan los procesos difusivos a edades superiores solo se analiza a edades tempranas donde predomina la succión capilar, aunque es de suponer que a estas edades también exista difusión aunque su influencia es en menor proporción.

1.4.3 Estudio de las propiedades mecánicas del hormigón con adiciones de cenizas de bagazo en un concreto de árido reciclado (Rattapon Somna, 2011).

En esta investigación, se utilizó árido grueso reciclado para reemplazar totalmente el árido grueso natural y así producir un hormigón mejor. Se utilizó cenizas de bagazo para reemplazar parcialmente cemento y mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad. La novedad de esta investigación es la utilización de los residuos de las industrias de caña de azúcar y desperdicios de obras de hormigón.

La ceniza de bagazo (CBCA) se utilizó para reemplazar el cemento Portland Tipo I y cemento con agregados reciclados en los 20 %, 35 %, y 50 % en peso de aglutinante. Se determinó la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, permeabilidad al agua así como la penetración de los iones cloruros.

La permeabilidad del hormigón se calcula por la siguiente ecuación.

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} , \quad 1.3$$

donde:

K : Coeficiente de permeabilidad al agua (m/s)

ρ : Densidad de agua (kg/m³)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

Q : Velocidad de flujo (m³/s)

L : Espesor de la muestra de hormigón (m)

P : Presión absoluta de agua ($\text{kg m/m}^2/\text{s}^2$)

A : Área de la sección transversal de muestra de hormigón (m^2)

El coeficiente de permeabilidad al agua del hormigón con agregados naturales (CON) es menor que la de hormigón de árido reciclado sin CBCA. Cuando se utilizó CBCA para reemplazar el cemento 20 % y 35 %, el coeficiente de permeabilidad disminuye claramente. Para sustituciones de un 50 % el coeficiente de permeabilidad fue tan mayor como el hormigón de árido reciclado sin CBCA. Esto indica que para un alto volumen de CBCA en el hormigón (CBCA 50 %) no es efectiva en la mejora de la durabilidad, pues la cantidad de Ca(OH)_2 liberado del cemento no es suficiente para reaccionar con CBCA para formar silicato de calcio hidratado adicional (S-C-H).

Resultados indican que el hormigón con agregados tenía una resistencia a los iones cloruro inferior a la del hormigón CON porque el volumen de los poros en estos es mayor que la de hormigón CON. Cuando se utilizó CBCA para reemplazar parcialmente cemento en concreto reciclado de agregado, la penetración de cloruros disminuyó y fue más bajos que los de hormigones CON y de árido reciclado sin CBCA. Mientras mayor es el reemplazo de CBCA en el concreto de agregado reciclado aumenta la resistencia del hormigón a la penetración de cloruro. Esto es debido a que con estas adiciones disminuye los tamaños del poro.

En este trabajo también aparece la deficiencia de no contar con un modelo que permita calcular los parámetros cinéticos del proceso de absorción de agua en el hormigón en todas las edades.

1.4.4 El uso de la zeolita como material puzolánico (Shekarchi, 2009).

En este trabajo, se analiza la eficacia de la zeolita en la mejora de las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto y también se hace una comparación con el humo de sílice como otro aditivo puzolánico importante.

Varios parámetros de las muestras fueron evaluados, entre ellos la absorción de agua y la difusión de iones cloruros.

Los resultados indican que las mezclas con adiciones de zeolita natural (ZN) y humo de sílice (HS) muestran una menor absorción de agua que la mezcla de control. Todas las mezclas que incluyen ZN no tienen una considerable diferencia en el porcentaje de absorción de agua. La ZN tiene más eficacia que la HS en la reducción de la absorción de agua al nivel de 5 %. Para el concreto que contiene adiciones de humo de sílice, cuanto mayor sea el nivel de reemplazo, mayor es el efecto de reducción de la absorción de agua.

La zeolita natural es más eficaz que la ceniza de combustible pulverizado (ceniza volante) en términos de difusión de cloruro de hormigón pero es menos eficaz que el humo de sílice. Se puede encontrar que las mezclas de concreto con 10 % de los niveles de reemplazo de ZN tienen una menor permeabilidad en comparación con la de los hormigones de control y HS con igual niveles de reemplazo.

Las adiciones de zeolita y humo de sílice alcanzan resultados extraordinarios en el concreto en todos los parámetros. La zeolita natural mostró menor reactividad puzolánica que el humo de sílice.

1.5 Resultados del análisis de estos trabajos

Del análisis de estos trabajos se puede concluir comparando los resultados obtenidos que la zeolita natural utilizado es más efectiva en términos de mejorar la resistencia a la compresión del hormigón debido a la alta pureza. La sustitución de cemento con un máximo de 20 % zeolita natural hace que disminuya la absorción de agua y el coeficiente de difusión. También disminuye la permeabilidad al oxígeno con la sustitución hasta un 10 % de zeolita natural.

Este estudio a pesar de contar con un modelo difusivo y poner en práctica la Ley de Fick para hacer los cálculos de los coeficientes cinéticos, sólo analizan estos parámetros en períodos muy cortos de tiempo, donde predomina la absorción capilar y no se tiene en cuenta que en períodos superiores el hormigón también está sometido a procesos difusivos a través de los poros de gel.

De los análisis anteriores, se pone de manifiesto que en la mayoría de las investigaciones sobre transporte de agua en hormigones adicionados y sin adiciones se enfocan más en el aspecto cualitativo del proceso. Cuando se desarrolla un análisis cuantitativo del agua incorporada por cada material solo toman en consideración lo que ocurre a edades tempranas del proceso sin tener en cuenta el proceso difusivo que predominan a edades superiores.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

Cuando se emplean modelos que tienen en cuenta la absorción del agua en el hormigón a través de los poros capilares y los poros pequeños o poros de gel, se caracteriza de una forma más precisa el proceso de absorción en el material en relación con otros trabajos más cualitativos (Villar Cociña, 2005). En este trabajo se tendrá en cuenta el proceso de absorción de agua por capilaridad y por difusión, por lo que se implementarán modelos compuestos capilar-difusivos no empleados comúnmente en la literatura. Dichos modelos ofrecen una valoración más completa del fenómeno. Se calcularán los parámetros cinéticos de hormigones adicionados con escoria siderúrgica, cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cascarrilla de arroz, analizándose a partir de los resultados los materiales más óptimos así como sus dosificaciones.

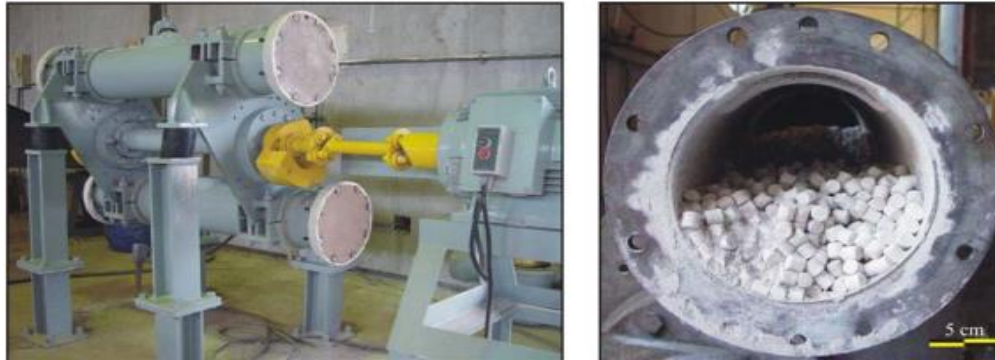
2.1 Materiales

Las dos primeras datas experimentales fueron tomadas de la Tesis Doctoral de Cordeiro y de una de sus publicaciones realizadas en el 2012 (E.M.R. Fairbairn, 2009, Cordeiro, 2006). Las probetas de concreto armado empleadas en los ensayos de humectación poseen adiciones de cenizas de bagazo y cenizas de cáscara de arroz en las mismas proporciones de 10 %, 15 % y 20 %, en tanto la tercera data fue tomada de la publicación científica realizada por los investigadores (Mejia, 1997). En este caso las probetas de concretos poseen adiciones de GGBS en un 60 %, 70 % y 80 %.

Las cenizas de bagazo y de cáscara de arroz fueron obtenidas de la quema respectiva mediante procesos controlados de bagazo de caña de azúcar y cáscara de arroz (Cordeiro, 2006).

Para reducir el tamaño de las partículas de las cenizas de bagazo y cáscara de arroz fue utilizado un molino vibratorio de 10 cm de diámetro y 33 litros de capacidad (*Ilustración 1*). Esta operación fue realizada en el Laboratorio de Tecnología Mineral de COPPE/UFRJ situado en Rio de Janeiro, Brasil. Las muestras se tomaron en proporciones iguales al cabo de 120 min de funcionamiento del molino, obteniéndose cenizas ultrafinas.

Ilustración 1 - Foto de molino vibratorio.



La **Tabla 1** ofrece la composición de los concretos de resistencia convencional, además la dosificación de Cemento Portland empelada y los correspondientes aditivos empleados.

Tabla 1 - Composición de los concretos de resistencia convencional.

Materiales						
Mezclas	Cemento Portland	Aditivo Mineral	Agregado fino	Agregado grueso	agua	Aditivo super plastificante
Ultrafina SCBA						
10 %	329,31	36,59	724,70	1.001,00	223,30	-
15 %	311,02	54,89	724,70	1.001,00	223,30	-
20 %	292,72	73,18	724,70	1.001,00	223,30	-
Ultrafina CCA						
10 %	329,31	36,59	723,97	999,85	220,30	0,36
15 %	311,02	54,89	723,86	999,55	220,30	0,43
20%	292,72	73,18	723,67	1.001,00	220,30	0,54

En la **Tabla 2** se exponen además un grupo de propiedades de las cenizas empleadas como aditivos puzolánicos.

Tabla 2 - Propiedades de las cenizas empleadas.

Propiedades	Ceniza ultrafina de bagazo	Ceniza ultrafina de cáscara de arroz
D₈₀ (μm)	8,48	6,83
Superficie específica Blaine (m²/kg)	893	-
Superficie específica B.E.T (m²/kg)	-	33,672
Masa específica (kg/m³)	2.530	2.293
Índice de actividad puzolánica	100	109
SiO₂	78,34	82,62

La **Tabla 3** refleja la composición química cemento Portland utilizado. Por otro lado las adiciones de GGBS mostraron altos contenidos de sílice y alúmina de alrededor del 50 %, seguido de calcio, magnesio y hierro con alrededor de un 42 %.

Tabla 3 - Composición química de OPC.

Cemento	SC₃	SC₂	AC₃	FAC₄
OPC	46,95	19,98	14,64	5,33

La **Tabla 4** brinda la información de los datos generales de las muestras de GGBS con la composición correspondiente, el régimen de curado al que fueron sometidas y la temperatura preconditionada.

Tabla 4 - Datos generales de las muestras GGBS.

Designación de las muestras	Composición	Régimen de curado por 15 días	Temperatura pre condicionada
S80W100	CPO + 80%	agua	100 °C
S70W100	CPO + 70%	agua	100 °C
S60W100	CPO + 60%	agua	100 °C

2.2 Métodos experimentales

2.2.1 Método para el estudio de los hormigones adicionados con cenizas ultrafinas de bagazo y de cascarilla de arroz

Se prepararon especímenes cilíndricos con 110 mm de diámetro y 200 mm de altura a una temperatura constante de 21 °C.

Antes de comenzar la prueba de absorción, las muestras se secaron durante 25 días a una temperatura de 45 °C en un horno ventilado hasta lograr que la masa fuera constante. Con la excepción de una cara que fue colocada en una bandeja llena de agua a un nivel de 5 mm, todas las demás fueron selladas con una cinta impermeable. De esta manera se obtiene un problema unidimensional y se facilita la solución matemática de los parámetros a calcular. La variación de las masas de las muestras fue supervisada periódicamente para así poder determinar la cantidad de agua absorbida en cada uno de los casos.

2.2.2 Método para el estudio de los hormigones adicionados con escoria siderúrgica (GGBS)

Las muestras empleadas fueron de forma cilíndrica. Las mismas tenían un diámetro de 50,8 mm y una altura de 50 mm. Las probetas fueron sumergidas en agua durante 15 días. Posteriormente se sometieron a 100 °C durante 6 horas y después se dejaron secar al vapor durante 24 horas.

Todas las caras de las muestras fueron selladas con una sustancia orgánica impermeable, excepto una de las caras que absorbía agua de una esponja

delgada de 3 mm de espesor. Esto se realizó con el objetivo de simplificar la complejidad del problema y hacerlo unidimensional.

Un esquema general del ensayo en ambos casos se aprecia en la ilustración siguiente:

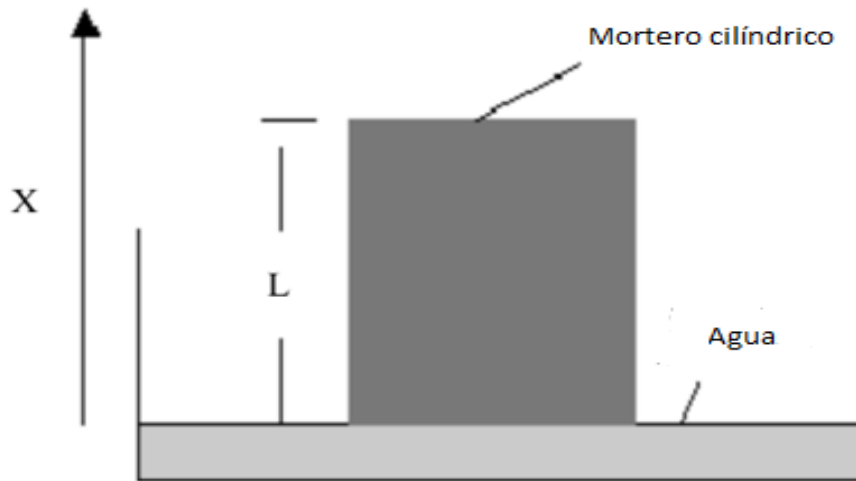


Ilustración 2 - Esquema del ensayo de absorción.

2.3 Formulación del problema de absorción de agua en concretos armados. Modelo capilar - difusivo (Villar Cociña, 2005)

Los resultados obtenidos tanto por (Cordeiro, 2006) como por (Mejia, 1997) tienen un carácter cualitativo, pues no se calcularon los coeficientes cinéticos de absorción de agua. Estos autores solamente compararon cualitativamente unos materiales con otros y con relación a la muestra patrón de cemento Portland sin adiciones. Como se ha explicado, una valoración más rigurosa del comportamiento de la cinética de absorción de agua por estos materiales es posible cuando se emplean modelos que consideren tanto la absorción en los capilares, como la difusión en los poros pequeños. 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.

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, 1986) o sea:

$$\frac{M}{A} = S t^{1/2}, \quad (2.1)$$

Donde S es el coeficiente de absorción capilar medido en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$. 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, 1997a). 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 (Yunping Xi, 1994, Martys, 1997a). 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:

$$\frac{M}{A} = St^{\frac{1}{2}} + \textit{término difusivo} , \quad (2.2)$$

donde:

M : Masa de agua absorbida

A : Área de la muestra

S : Coeficiente de sorptividad

t : Tiempo

El primer término de la Ec. (2.2) puede escribirse como (Martys, 1997b):

$$N\rho \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{St^{\frac{1}{2}}}{N\rho} \right) \right\}, \quad (2.3)$$

donde:

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

ρ : Densidad del agua.

Este término fue construido tal que para edades tempranas en el límite, cuando $t^{\frac{1}{2}} < N \frac{\rho}{S}$, la expansión de la exponencial (2.3) se reduce a la expresión (2.1).

El término difusivo en la ecuación (2.2) 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 (**Ilustración 2**) 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:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2.4)$$

donde:

C : Concentración de agua

t : El tiempo

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:

$$C(x, 0) = 0 \quad \forall x \in (0, L) \quad (2.5)$$

$$C(0, t) = C_o, \forall t \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad x = L, \quad \forall t \quad (2.7)$$

La condición límite (2.6) muestra la invariancia de la concentración de agua (C_0) en la superficie para cada muestra.

La condición límite (2.7) 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:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t \right] \sin \left(\frac{2n+1}{2L} \right) \pi x. \quad (2.8)$$

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 A de la superficie permeable es:

$$M = \iiint_V C(x, t) dx dy dz = A \int_0^L C(x, t) dx \quad (2.9)$$

$$M = AC_0 L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t \right] \right\}. \quad (2.10)$$

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

$$\frac{M}{A} = C_0 L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t \right] \right\} \quad (2.11)$$

Sustituyendo la ecuación (2.11) en el segundo término de la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\frac{M}{A} = N\rho \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{St^{\frac{1}{2}}}{C\rho}\right) \right\} + C_o L \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D t\right] \right\} \quad (2.12)$$

Esta ecuación (2.12) 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).

Capítulo 3: Resultados y discusión

Los datos experimentales, como se ha señalado, fueron extraídos a partir de resultados de los ensayos de humectación realizados con los materiales en estudio y publicados por (Cordeiro, 2006, Hall, 1986). Con la implementación del software Gráfula 3.1, se obtuvieron los datos de masa de agua incorporada por unidad de área (M/A) Vs. $t^{1/2}$. Para el ajuste con el empleo del modelo capilar difusivo se construyeron curvas de M/A Vs. t . Este es un ensayo tradicional, cuyo objetivo es el análisis de los resultados tanto cualitativos como cuantitativos, pero sobre todo en su aspecto cuantitativo mediante el cálculo de los parámetros cinéticos considerando la ocurrencia de ambos procesos (capilar y difusivo).

3.1 Análisis cualitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que poseen adiciones de GGBS, CSBA Y RHA.

En la **Ilustración 3** se muestran las curvas del proceso de absorción de agua para hormigones que poseen adiciones de GGBS para un 60 %, 70 % y 80 %. Desde el punto de vista cualitativo 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 y todo el proceso de absorción transcurre por los pequeños poros por mecanismos difusivos.

Las muestras de GGBS 80 %, GGBS 70 %, GGBS 60 % poseen un similar comportamiento en el proceso de absorción de agua. Desde el punto de vista cualitativo no alcanzan diferencias notables aunque en una pequeña proporción aquellas que tienen sustituciones de un 60 % son las que absorben mayor cantidad de agua tanto a edades tempranas como a edades superiores. En la primera fase las muestras de GGBS en un 80 % alcanzan la proporción más pequeña de agua incorporada, pero a lo largo del tiempo la de GGBS 70 % es quien absorbe una menor cantidad.

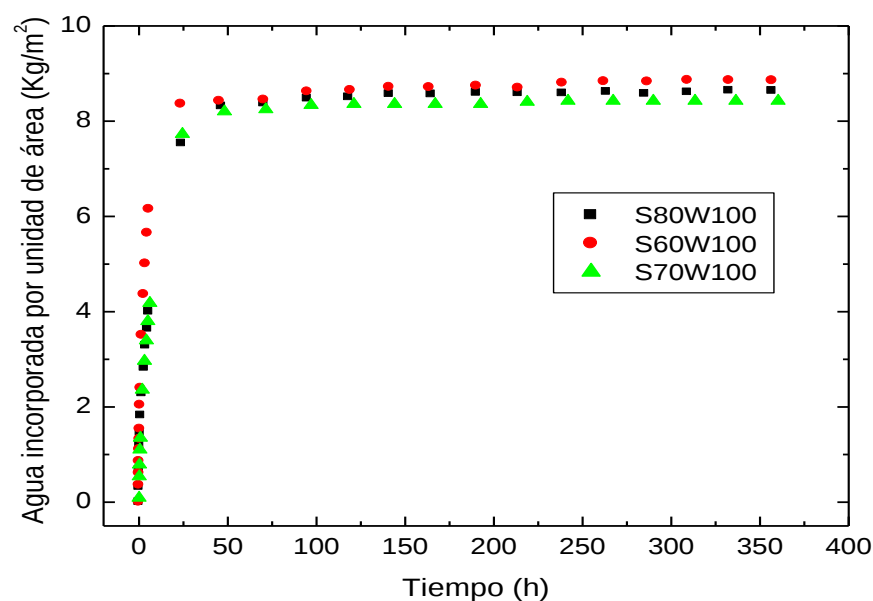


Ilustración 3 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de GGBS.

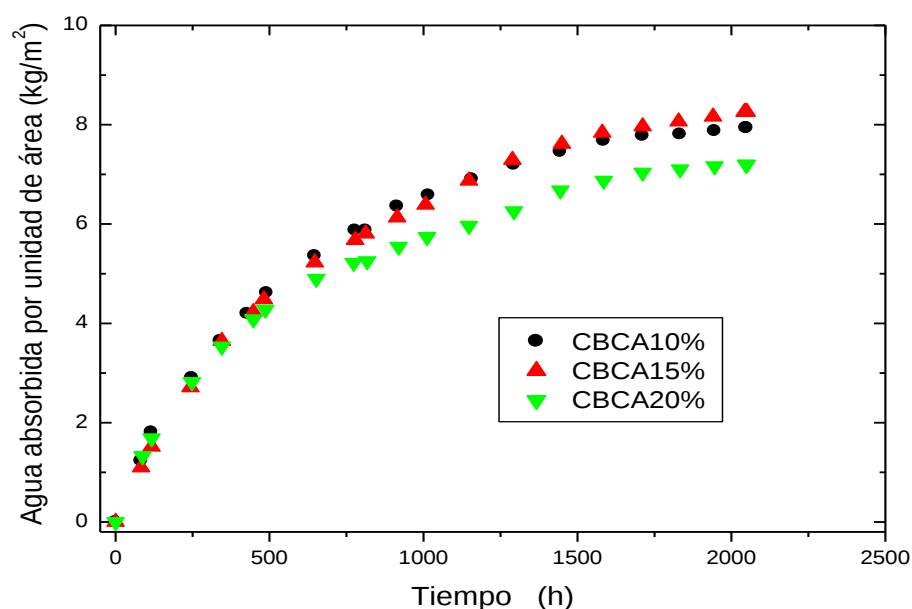


Ilustración 4 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de CBCA.

La **Ilustración 4** presenta el comportamiento de absorción de agua en los hormigones compuestos con adiciones de 10 %,15 % y 20 % de ceniza ultrafina de bagazo de caña (CBCA). En períodos iniciales de tiempos, desde el

punto de vista cualitativo, el comportamiento para las tres tipos de muestras es similar. La sustitución más óptima se alcanza para un 20 %, pues esta provoca un mejor refinamiento en la estructura de los poros. Cabe señalar que para los instantes iniciales casi no se aprecia un comportamiento que pudiera considerarse lineal (a diferencia de las muestras de GGBS). Esto da una medida que la absorción capilar en estas muestras es mucho menor que en las de GGBS y juega un papel más importante la difusión a través de los pequeños poros y poros de gel. Nótese además la cantidad de horas que requiere para incorporar la cantidad de agua por unidad de área mayor. Esto es un indicador cualitativo de que el empleo de esta ceniza ultrafina de bagazo provoca una disminución considerable de la permeabilidad del hormigón por lo cual es muy útil. Este buen desempeño se debe a su buena actividad puzolánica y al refinamiento de poros que ella produce.

La **Ilustración 5** brinda una información cualitativa de los procesos de absorción de agua en los hormigones que poseen adiciones de ceniza ultrafina de cáscara de arroz para un 10 %, 15 % y 20 %.

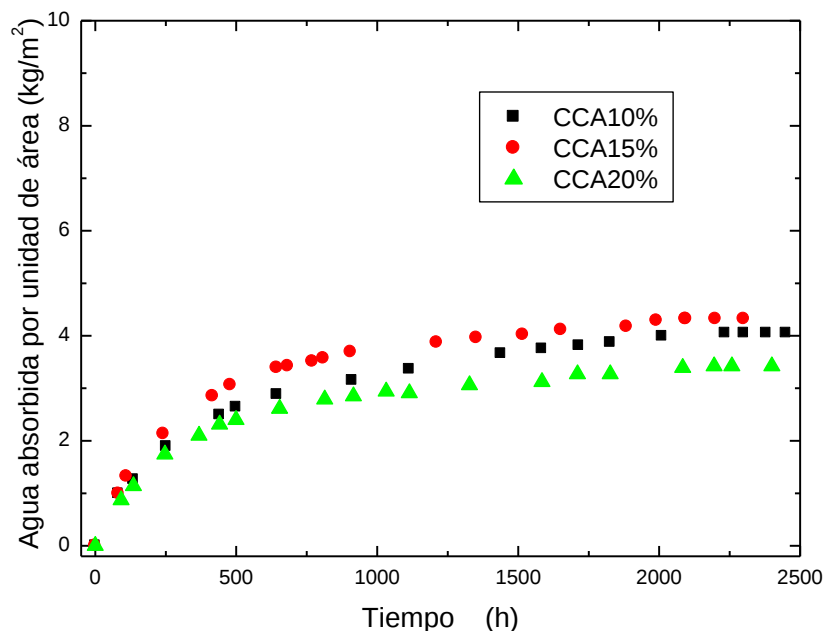


Ilustración 5 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de CCA.

Las tres muestras reflejan un comportamiento relativamente similar. Se aprecia que tanto a edades tempranas como a edades superiores la acumulación de agua es prácticamente constante. Las muestras que presenta un 20 % de adición de ceniza ultrafina de cáscara de arroz alcanzan los resultados más satisfactorios. Para este porcentaje de adiciones la capacidad de absorber agua en todas las edades es menor comparada con los demás porcentajes. Esta proporción es la que alcanza un mejor refinamiento de los poros capilares que conforman la microestructura del hormigón, logrando que este posea una menor permeabilidad y una mayor durabilidad. Como puede apreciarse a edades tempranas no existe ningún indicio de un comportamiento que pueda considerarse lineal, por lo que es de esperar que la absorción por capilaridad casi no exista. La alta actividad puzolánica de la CCA y su gran finura producen un hormigón con un nivel muy alto de refinamiento de poros. Su durabilidad crece considerablemente.

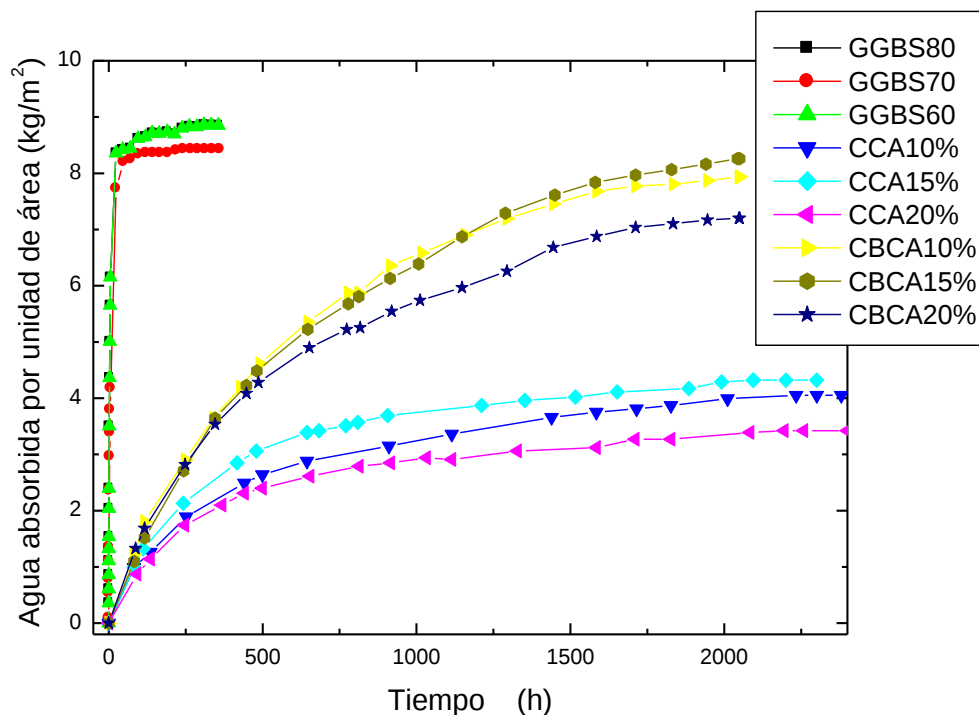


Ilustración 6 - Curvas de absorción capilar para hormigones con adiciones de GGBS, CBCA y CCA.

En la **Ilustración 6** y a modo de comparación se muestran las curvas de absorción de agua para todos los hormigones que contiene porcentajes de adiciones de escoria granulada (GGBS), ceniza ultrafina de bagazo de caña de azúcar (SCBA) y ceniza ultrafina de cáscara de arroz (CCA).

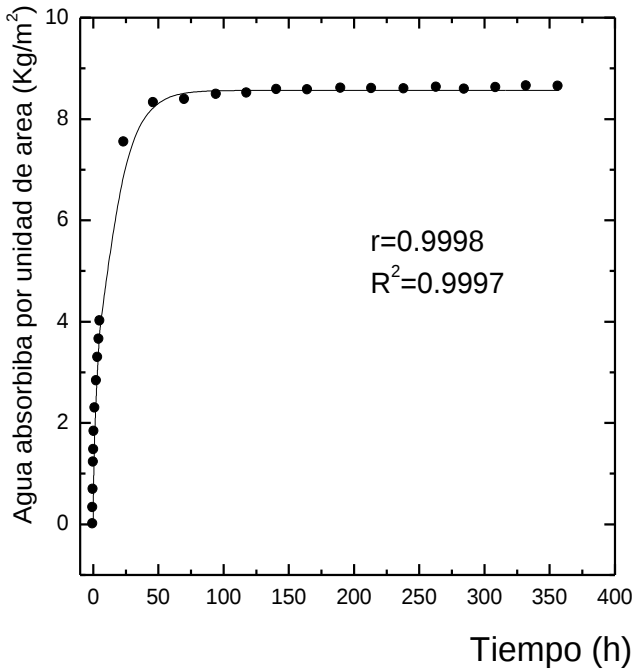
Según la información cualitativa que brindan las gráficas, a edades tempranas las muestras que poseen adiciones de GGBS presenta un nivel mucho mayor de agua incorporada al concreto en comparación con las muestras que están compuestas por las adicciones de CSBA y CCA. Esto da una idea del rol fundamental que juega la capilaridad en este caso, nótese la alta pendiente a edades tempranas y su comportamiento con alta tendencia a lo lineal. Al cabo de muy poco tiempo ya todas las muestras alcanzan su mayor nivel de agua incorporada. En el caso de la CSBA se observa una menor pendiente lo cual da un indicio de que el efecto de absorción por capilaridad disminuye y toma más relevancia el proceso difusivo a través de los poros más pequeños. Con el transcurso del tiempo el comportamiento tiende a ser difusivo y bastante similar para todos los hormigones porque la absorción a través de los pequeños poros y gel de poros es prácticamente la misma. Desde el punto de vista cualitativo la ceniza ultrafina de cáscara de arroz es la puzolana que mejor reacciona con el cemento en el refinamiento de los poros, seguida por la ceniza de bagazo de caña y por último la escoria siderúrgica (GGBS).

3.2 Análisis cuantitativo del proceso de absorción capilar en los hormigones que poseen adiciones de GGBS, CSBA Y CCA.

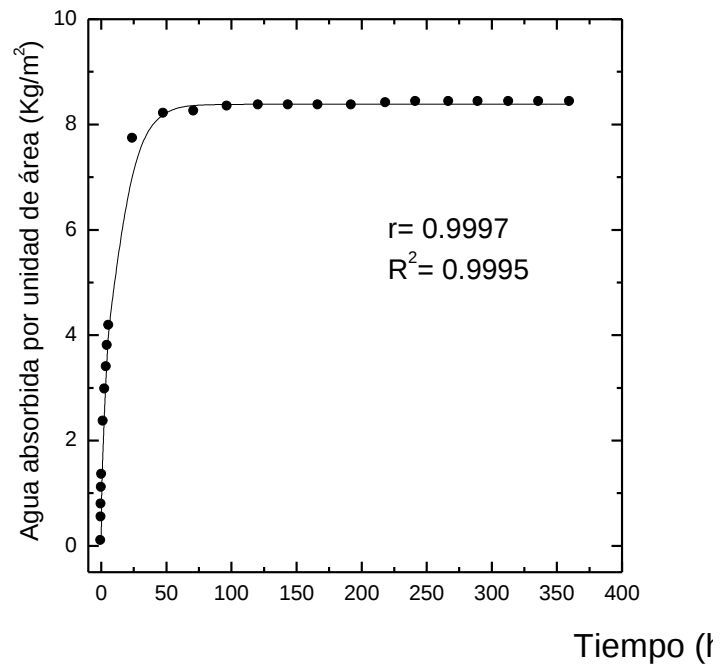
En las ilustraciones 7a, 7b y 7c se muestra el agua absorbida por unidad de área (M/A) Vs. tiempo (t) para las muestras GGBS 80 %, GGBS 70 % y GGBS 60 %. La línea continua representa la curva del modelo ajustado. El ajuste del modelo (Ec. (2.12)) nos permitió determinar los parámetros S , D y Co en cada caso.

Un análisis exhaustivo de los parámetros estadísticos más importantes, como el coeficiente de correlación r , coeficiente de múltiple determinación (R^2), suma residual de cuadrados (RSS), 95 % intervalos de confianza, dispersión de residuales, la probabilidad de residuales y análisis de varianza (lo cual constituye una rigurosa evaluación del proceso de ajuste del modelo a los datos experimentales), permite concluir que, en el caso de las muestras GGBS

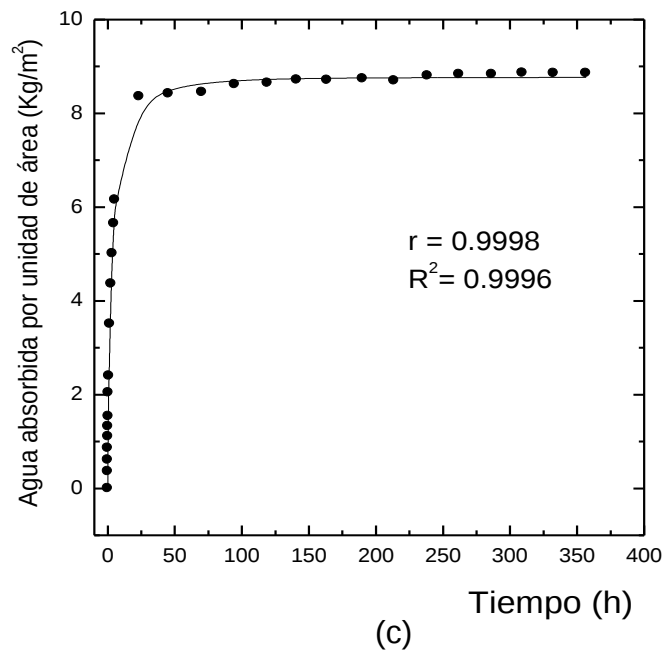
80 %, GGBS 70 % y GGBS 60 % se aprecia un comportamiento capilar-difusivo, o sea, la presencia de ambos procesos en la incorporación del agua a la muestra.



(a)



(b)

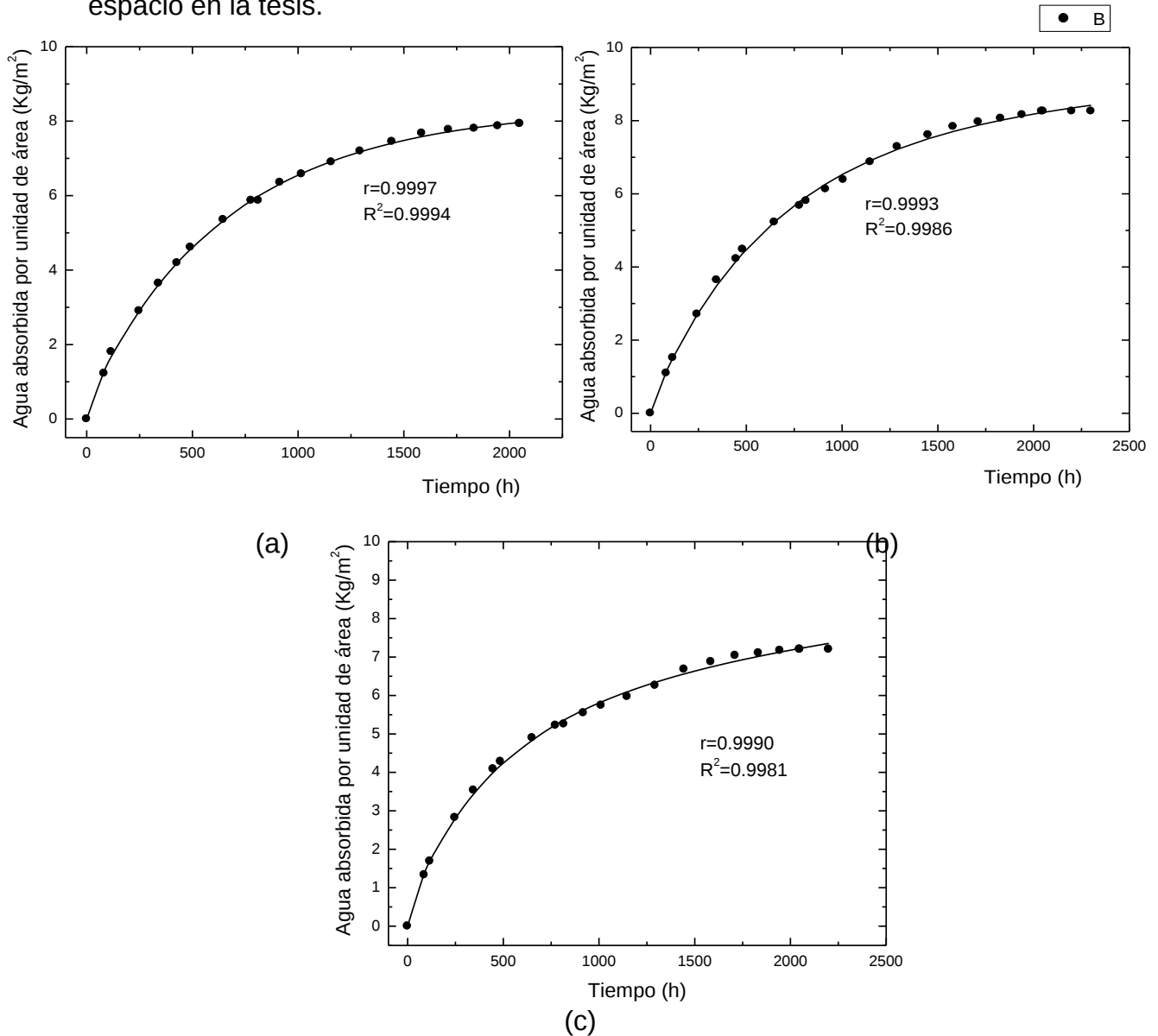


(c)

- Experimental _____ Modelo

Ilustración 7 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones: a) 80 %, b) 70 % y c) 60 % de GGBS respectivamente.

En todas las ilustraciones se muestran los coeficientes de correlación (r) y múltiple determinación (R^2). En este trabajo solo se muestran algunos parámetros (r , R^2 , SE y RSS) ya que los otros (mencionados anteriormente) están relacionados con análisis gráfico y grandes tablas que abarcarían mucho espacio en la tesis.



- **Experimental** _____ **Modelo**

Ilustración 8 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones de cenizas ultrafinas de bagazo de caña de azúcar: a) 10 %, b) 15 % y c) 20 % de CBCA.

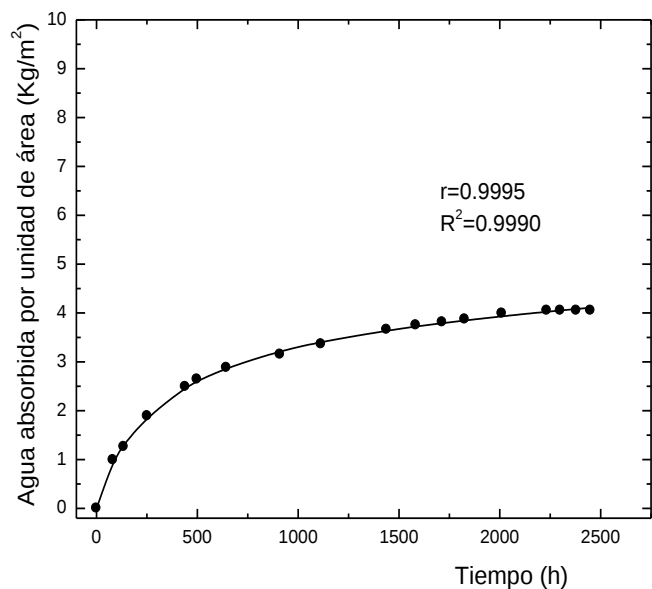
Los valores de estos parámetros se muestran en la **Tabla 5**. Acorde con los valores de los coeficientes S y D las muestras GGBS 80 %, GGBS 70 %, GGBS 60 % muestran un similar comportamiento, lo cual está acorde con el análisis cualitativo realizado previamente. La muestra GGBS 80 % es la que presenta una mayor absorción capilar (S) seguida muy de cerca por GGBS 60 % y por GGBS 70 %. Estos valores altos de S están en correspondencia con la alta pendiente que se aprecia a edades tempranas en estos materiales (Ilustraciones. 7a, 7b y 7c).

Por su parte en las ilustraciones 8a, 8b y 8c reflejan el agua absorbida por unidad de área (M/A) Vs. tiempo (t) para las muestras de hormigones adicionados con cenizas ultrafinas de bagazo de caña de azúcar con 10 %, 15 % y 20 %. En este caso el ajuste del modelo reflejó un comportamiento también capilar-difusivo pero con un coeficiente de absorción capilar muy pequeño. Esto está acorde con la pequeña pendiente que se aprecia en estas curvas de absorción de agua en los instantes iniciales. El ajuste del modelo (Ec. (2.12)) nos permitió determinar los parámetros S , D y Co en cada caso, realizando el mismo análisis estadístico mencionado anteriormente.

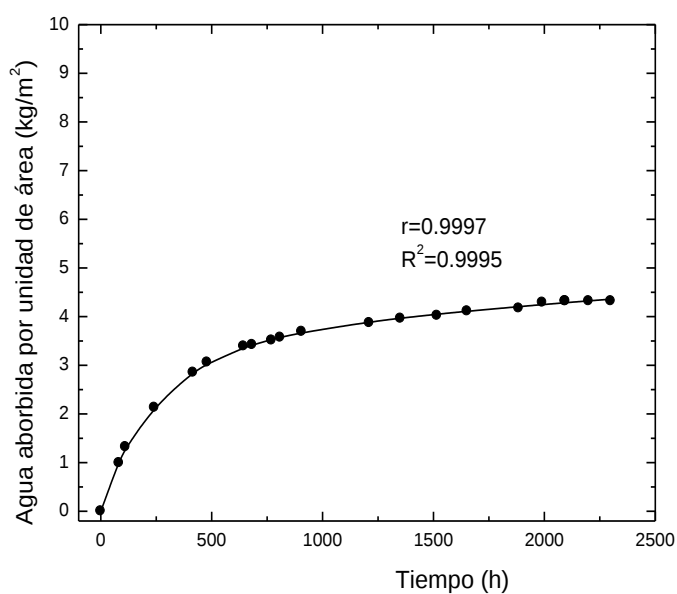
Los valores de los parámetros S , D y Co se muestran en la **Tabla 5**. Acorde con los valores de los coeficientes S y D las muestras de CBCA con 10 % y 15% muestran un comportamiento similar, siendo el coeficiente de absorción capilar un poco menor para el caso de la muestra de CBCA 20 %. Estos valores más bajos de S en relación con las muestras de GGBS están en correspondencia con la menor pendiente que se aprecia a edades tempranas en estos materiales (ilustraciones. 7a, 7b y 7c) y están acordes al análisis cualitativo realizado anteriormente. Esto refleja las mejores cualidades de este material puzolánico para la impermeabilidad y aumento de la durabilidad del hormigón debido fundamentalmente a su actividad puzolánica y al refinamiento de poros que produce.

Por último, para el caso de los hormigones adicionados con ceniza ultrafina de cáscara de arroz se muestra en las ilustraciones 9a, 9b y 9c el agua absorbida por unidad de área (M/A) Vs. tiempo (t) para las muestras 10 %, 15 % y 20 %. En este caso el ajuste del modelo reflejó un comportamiento difusivo puro, no

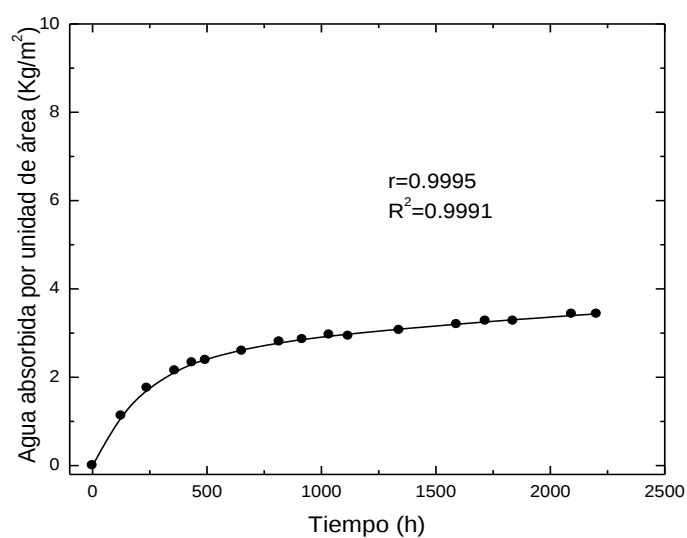
apreciándose un comportamiento capilar-difusivo como en los casos anteriores. Esto está acorde con el inexistente comportamiento supuestamente lineal a edades tempranas, sin que exista una pendiente a estas edades que pueda significar algo en estas curvas de absorción de agua a edades tempranas.



(a)



(b)



(c)

- Experimental ————— Modelo

Ilustración 9 - Cantidad de agua absorbida por unidad de área para muestras con adiciones de cenizas ultrafinas de cáscara de arroz: a) 10 %, b) 15 % y c) 20 % de CCA.

El ajuste del modelo (Ec. (2.12)) nos permitió determinar los parámetros D y C_o en cada caso. De acuerdo con los valores del coeficiente de difusión D las muestras con 10 % y 15 % ilustran un comportamiento muy similar, siendo el coeficiente de difusión algo menor para la muestra con 20 % de CCA. De acuerdo con estos resultados este es un excelente material puzolánico que disminuye grandemente la permeabilidad del hormigón, provoca un gran refinamiento de poros y por lo tanto un previsible aumento notable de su durabilidad.

Tabla 5 - Valores de los parámetros cinéticos.

Muestras	$S(\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{1/2})$	$C_o(\text{kg}/\text{m}^3)$	$D(\text{m}^2/\text{s})$
GGBS80%	$1,9 \pm 0,2$	$140,5 \pm 5,4$	$(4,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$
GGBS70%	$1,6 \pm 0,1$	$137,3 \pm 8,3$	$(9,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$
GGBS60%	$1,7 \pm 0,1$	$94,6 \pm 3,8$	$(2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
CBCA10%	$(7,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$36,9 \pm 0,8$	$(2,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
CBCA15%	$(5,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$31,1 \pm 0,9$	$(2,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
CBCA20%	$(3,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-5}$	$18,3 \pm 0,7$	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$
CCA10%		$19,7 \pm 0,3$	$(4,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$
CCA15%		$20,9 \pm 0,2$	$(4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$
CCA20%		$16,3 \pm 0,2$	$(4,4 \pm 2,4) \cdot 10^{-5}$

En general tomando en consideración los resultados mostrados en la **Tabla 5** podemos afirmar que de los tres materiales puzolánicos analizados el que más disminuye la permeabilidad es la ceniza de cáscara de arroz (CCA) incorporada al hormigón en un 20 %, seguido por la CCA 10 %, CCA 15 %, CBCA 20 %, CBCA 15 %, CBCA 10 %, GGBS 70 %, GGBS 60 % y por último el material que menos disminuye la permeabilidad es la ceniza de escoria siderúrgica (GGBS) incorporada al hormigón en un 80 %.

CONCLUSIONES:

1. La aplicación del modelo capilar-difusivo conjuntamente con la evaluación cualitativa de los diferentes materiales puzolánicos permite caracterizar de una forma más precisa el fenómeno de transporte de agua en hormigones y determinar cuáles son los más adecuados para su uso acorde a las condiciones climáticas del lugar de construcción.
2. 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.
3. El grado de actividad puzolánica del residuo utilizado, así como su finura, tiene una influencia primordial en los valores calculados de los parámetros cinéticos (S y D) influyendo decisivamente en la disminución de la permeabilidad del hormigón lo cual se debe fundamentalmente al refinamiento de poros que producen en el hormigón.
4. De acuerdo con los valores de los parámetros cinéticos calculados se puede afirmar que de los tres materiales puzolánicos analizados el que más disminuye la permeabilidad es la ceniza de cáscara de arroz (CCA) incorporado al hormigón en un 20 %, seguido por la CCA 10 %, CCA 15 %, CBCA 20 %, CBCA 15 %, CBCA 10 %, GGBS 70 %, GGBS 60 % y por último el material que menos disminuye la permeabilidad es la ceniza de escoria siderúrgica (GGBS) incorporada al hormigón en un 80 %.
5. Los resultados del trabajo demuestran la importancia de considerar no solo la acción capilar a edades tempranas (lo cual hacen muchos autores de nivel internacional), sino también la difusión que ocurre paralelamente a todas las edades, y es en ocasiones, la que juega el papel primordial en el proceso, como se puede apreciar en el caso de las cenizas ultrafinas de cenizas de cáscara de arroz, donde el papel fundamental lo juega la difusión.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la coordinación con el Centro Técnico de desarrollo de Materiales de Construcción (CTDMC) de la Habana para el desarrollo de ensayos experimentales de absorción en hormigones adicionados con residuos cubanos tales como: ceniza de bagazo de caña de azúcar, ceniza de residuos de bambú así como la zeolita cubana tanto del yacimiento de Tasajeras como de Palmarito. Todos estos materiales ya han sido investigados y caracterizados desde el punto de vista puzolánico en investigaciones realizadas en nuestro departamento, lo cual adelanta este futuro trabajo de durabilidad y corrosión.
2. El análisis realizado tanto cualitativo como cuantitativo considera que la absorción capilar y la difusión son los principales mecanismos para la absorción de agua en hormigones con adiciones puzolánicas, pero no considera (por tener una menor contribución) otros mecanismos (tales como osmosis, migración térmica, etcétera) que pueden estar presente en la incorporación y movimiento de agua en estos materiales. Por lo que para próximas investigaciones se recomienda analizar la posible repercusión de estos mecanismos y su grado de incidencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COCINHA, E., FRÍAS, M., VALENCIA MORALES, E. & SAVASTOGH, H 2009. Study of the pozzolanic reaction kinetics in sugar cane bagasse–clay ash/calcium hydroxide system: kinetic parameters and pozzolanic activity. *Advances in Cement Research*, 21, 23-30.
- COCINHA, M. F. & TALERO 2011. Adiciones activas al cemento: Inventario, caracterización y propiedades. Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción *Cement & Concrete Composites* 30, 56-67.
- CORDEIRO, G. C. 2006. Utilización de ceniza ultrafina de bagazo de caña de azúcar y cáscara de arroz como aditivo puzolánico.
- CHANDRASEKHAR, S., SANTYANARAYANA, K. G., PRAMADA, P. N., RAGHAVA, P. & GUPTA, T. N. 2003. Review. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview. *Journal of Materials Science*, 38.
- DA LUZ GARCIA, J. S. 2013. Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and Building Materials*, 41, 897-910.
- E.M.R. FAIRBAIRN, G. C. C., R.D. TOLEDO FILHO, M.M. SILVOSO, T.P 2009. Durability of concretes containing sugar cane bagasse ash. *Cement & Concrete Composites*, 9, 343-350.
- FRIAS, H. S., VILLAR, E., ROJAS, M. I. S. D. & SANTO, S. 2012. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cement & Concrete Composites*, 34, 1019-1023.
- FRIAS, M., VILLAR-COCINA, E., VALENCIA MORALES, E. 2007. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. *Waste Management*, 27, 533-538.
- GOUAL, M. S., DE BARQUIN, F., BENMALEK, M. L., BALI 2000. Estimation of the capillary transport coefficient of clayed aerated concrete using a gravimetric technique. *Cement & Concrete Composites*, 30.
- HALL, C. A. K. M. T., T 1986. Water movement in porous building materials VII: The sorptivity of mortars. *Bldg.Env*, 21, 113-118.
- JAMES, J. R., M. S 1986. Reactivity of rice husk ash. *Cement and Concrete* 16, 296-302.
- MARTYS, N. A. F. 1997a. Capillary transport in mortars and concretes. *Cement & Concrete Composites*, 27, 747-750.
- MARTYS, N. A. F. 1997b. Capillary transport in mortars and concretes. *Cement & Concrete Composites*, 27, 747-760.
- MEJIA, R. A. T., R 1997. Performance of GGBS cements”, Proceedings of the 13th International Conference on Solid Waste Technology and Management. *Proceedings of 2nd NACE Latin American Corrosion Congress*, September.
- MULLER, K. L. S., J. SKIBSTED, A.M. GAJEWICZ, P.J. MCDONALD 2015. Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from HNMR relaxometry. *Cement and Concrete*, 74, 116-125.
- RAHEEM, A. Y. A. A. 2010. A study of the permeability and acid attack of corn cob ash blended cements. *Construction and Building Materials*, 24, 403-409.
- RATTAPON SOMNA, C. J., POKPONG RATTANACHU, WICHIAN CHALEE 2011. Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Design*, 36, 597-603.

- SATA, V., JATURAPITAKKUL, C. & KIATTIKOMOL, K 2007. Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 1589-1598.
- SHEKARCHI, B. A. A. M. 2009. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious materia. *Cement & Concrete Composites*, 31, 334-341.
- SUMRERNG, P. C. 2011. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials and Design*, 34, 54-50.
- TAYLOR, H. F. W. 1997. Cement Chemistry. 2^a Edition ed., Thomas Telford Publishing.London., 434.
- VEGAS, I., FRIAS, M., URRETA, J. & SAN JOSÉ J. T. 2006. Obtención de una adición puzolánica a partir de la calcinación controlada de lodos de destintado de papel: estudio de prestaciones en matrices de cemento. *Materiales de Construcción*.
- VILLAR COCIÑA, E. V. M., J. VEGA LEYVA 2005. Kinetics of the water absorption in GGBS-concretes:
A capillary-diffusive model. *Computers and Concrete*, 2, 19-30.
- WEITING, Y. T. L., DONG OUYANG, SHARIZM ALI MEMON, FENG XIING, WEILUN WANG, YUAN 2015. Effect of rice husk ash finenss on porosity and hydration reaction of blened cement paste. *Construction and Building Materials*, 89, 90-101.
- YUNPING XI, Z. P. B., LARISSA MOLINA, HAMLIN M. JENNINGS 1994. Moisture Diffusion in Cementitius Materials. *Construction and Building Materials*, 41, 202-209.