

Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR

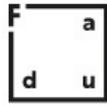


UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

**EFFECTOS DE LA CARBONATACIÓN EN MORTEROS DE CEMENTO CON ADICIÓN
DE DOS TIPOS DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ RESIDUAL URUGUAYA**

ARQ. WALTER GONZALO MUINELO GALLO

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE ARQUITECTURA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
MONTEVIDEO, 2020



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

EFFECTOS DE LA CARBONATACIÓN EN MORTEROS DE CEMENTO CON ADICIÓN DE DOS TIPOS DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ RESIDUAL URUGUAYA

AUTOR: ARQ. WALTER GONZALO MUINELO GALLO

TUTORA: PROFESOR TITULAR DRA. ARQ. GEMMA RODRÍGUEZ DE SENSALE

TESIS PRESENTADA CON EL OBJETIVO DE OBTENER EL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE ARQUITECTURA

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE ARQUITECTURA

FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

MONTEVIDEO, 2020

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Instituto de la Construcción de la FADU, al Instituto de Ensayo de Materiales de la FING, al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la FCIEN y a aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado en la realización de esta investigación.

Especialmente a Gemma Rodríguez de Sensale, por su generosidad, tiempo y dedicación, guía fundamental durante todo este proceso.

Por último, a mis padres y a mi familia, por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

RESUMEN

El objetivo general de la presente investigación consiste en analizar los efectos de la carbonatación para el caso específico de los morteros de cemento con adición de dos tipos de ceniza de cáscara de arroz (CCA) residuales generadas en Uruguay. A su vez, y a los efectos de complementar los estudios realizados sobre Cemento Portland Compuesto (CPC) en el proyecto ANII FSE 1-2011-1-6476, se analiza también la influencia de la incorporación de filler calcáreo y se realizan microscopías electrónicas de barrido (MEB), para determinar la relación entre la profundidad de carbonatación y los componentes utilizados en la confección de los morteros realizados. Los resultados obtenidos permiten concluir que la adición de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación. Además, la incorporación de los dos tipos de CCA utilizadas también aumenta la profundidad de carbonatación. Finalmente se observa que, si bien el empleo de CCA aumenta la profundidad de carbonatación, lo hace en menor porcentaje que el filler calcáreo. En base a los resultados obtenidos resulta posible señalar que existe la posibilidad de elaborar Cemento Portland Puzolánico (CPP) con el mismo porcentaje de sustitución de cemento que con el CPF; obteniendo de esta forma mejores prestaciones, dado que se lograría una menor profundidad de carbonatación y mejores propiedades mecánicas debido a la reacción puzolánica.

Palabras clave: CCA, filler calcáreo, carbonatación

ABSTRACT

The general objective of this research is to analyze the effects of carbonation for the specific case of cement mortars with the addition of two types of residual rice husk ash (RHA) generated in Uruguay. In turn, and in order to complement the studies carried out on Blended Cement in the ANII FSE 1-2011-1-6476 project, the influence of the incorporation of limestone filler is also analyzed, and Scanning Electron Microscope (SEM) were made so as to determine the relationship between the carbonation depth and the components used in the preparation of the mortars made. The results obtained allow us to conclude that the addition of limestone filler increases the carbonation depth. In addition, the incorporation of the two types of RHA used also increases the carbonation depth. Finally, it is observed that, although the use of RHA increases the carbonation depth, it does so in a lower percentage than the limestone filler. Based on the results obtained, it is possible to point out that there is the possibility of making Pozzolanic Portland Cement (PPC) with the same percentage of cement substitution as with the Limestone Filler Cement; obtaining in this way better benefits, since a lower carbonation depth and better mechanical properties would be obtained due to the pozzolanic reaction.

Keywords: RHA, limestone filler, carbonation

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1- INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. – OBJETIVOS	4
1.2.1. – OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2. – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. – ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	5
1.4. – ALCANCE DEL TRABAJO	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	7
2.1. – LA CARBONATACIÓN	7
2.2. – INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE CCA Y/O FILLER CALCÁREO EN MATERIALES CEMENTÍCEOS	11
CAPÍTULO 3: PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.1. – METODOLOGÍA EMPLEADA.....	48
3.2. – MATERIALES EMPLEADOS	50
3.3. – ELABORACIÓN Y PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	54
3.4. – CURADO.....	56
3.5. – ENSAYOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA.....	57
3.6. – ENSAYOS DE MICROSCOPIAS	60
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1 – INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE LAS ADICIONES ESTUDIADAS EN LA CARBONATACIÓN.....	62
4.2 – MICROSCOPIAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO	73
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	79
5.1 – EN RELACIÓN A LOS ENSAYOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA.....	80
5.2 – EN RELACIÓN A LOS ENSAYOS MICROESTRUCTURALES.....	81
5.3 – CONSIDERACIONES FINALES.....	82
5.4 – SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.....	82

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO A – RESULTADOS OBTENIDOS.....	91
ANEXO B – RESULTADOS OBTENIDOS SIN DATOS ESPURIOS.....	94
ANEXO C – FOTOGRAFÍAS DE LAS SECCIONES OBTENIDAS ANTES Y LUEGO DEL ENSAYO	97
ANEXO D – FICHAS	106
ANEXO E – MEB	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Profundidad de carbonatación de hormigones con cementos parcialmente reemplazados por escoria, filler calcáreo y ceniza volante.....	13
Figura 2. 2: Coeficientes de carbonatación acelerada K_c	16
Figura 2. 3: Profundidad de carbonatación en referencia a las relaciones agua/cemento (Gastaldini et al., 2007)	18
Figura 2. 4: Comparación de resistencia a la carbonatación de hormigones con CP y con CP con incorporación de filler calcáreo (a) relación a/c y (b) resistencia a los 28 días (cámara de carbonatación) (curado en agua a 20°C).....	20
Figura 2. 5: Comparación de profundidades de carbonatación con activadores añadidos (I), sin activador (A) y con CP común (C).....	21
Figura 2. 6: Profundidad de carbonatación a las 12 semanas.....	23
Figura 2. 7: Clasificación de poros de pastas (no carbonatadas y carbonatadas).....	25
Figura 2. 8: Progreso de la carbonatación de los hormigones con el tiempo de exposición.....	27
Figura 2. 9: Profundidad carbonatada (mm) vs Porcentaje de calcáreo a los 28 días en morteros hechos con diferentes clinkerres.....	29
Figura 2. 10: Representación esquemática del comportamiento medio observado de la profundidad carbonatada en función del porcentaje de calcáreo	30
Figura 2. 11: Efecto del filler calcáreo sobre la carbonatación: el filler calcáreo juega como lugar de nucleación para la precipitación del carbonato de calcio.....	36
Figura 2. 12: Profundidad de carbonatación en función de $t-0.5$ para todas las mezclas.....	37
Figura 2. 13: Distribución por país de los autores de las publicaciones recopiladas.....	40
Figura 2. 14: Influencia del filler calcáreo en la resistencia a la carbonatación de hormigones con igual relación a/c para (a) exposición natural y (b) carbonatación acelerada	42

Figura 2. 15: Influencia del filler calcáreo en la resistencia a la carbonatación de hormigones con la misma resistencia a los 28 días para (a) exposición natural y (b) carbonatación acelerada ..	42
Figura 2. 16: Variación del coeficiente de carbonatación acelerada y natural con una resistencia a la compresión f_{c28}	44
Figura 2. 17: Profundidad de carbonatación del hormigón con CPF. Relación agua/aglomerante (a) 0.65; (b) 0.61; (c) 0.53; y (d) 0.48.....	45
Figura 2. 18: Efectos de los reemplazos de filler calcáreo en la carbonatación: (a) 3 días de curado; (b) 28 días de curado	46
Figura 3. 1: Difracción de rayos X de cenizas de cáscara de arroz: (a) CCA ARROZUR; (b) CCA GALOFER.....	52
Figura 3. 2: MEB de filler calcáreo y cenizas de cáscara de arroz: (a) CCA ARROZUR; (b) CCA GALOFER; y (c) filler calcáreo	53
Figura 3. 3: (a y b) Moldes utilizados para la elaboración de las probetas, (c) probetas en los moldes y (d) probetas desmoldadas	54
Figura 3. 4: (a) Amasadora y (b) compactadora empleadas	55
Figura 3. 5: Vista general del total de probetas desmoldadas elaboradas.....	56
Figura 3. 6: Vista general de la cámara húmeda.....	57
Figura 3. 7: (a) Cámara de carbonatación acelerada y (b) vista de probetas desmoldadas dentro de la cámara de carbonatación acelerada	57
Figura 3. 8: (a) Probetas sanas, (b) prensa, (c) probetas rotas con prensa y (d) caras interiores rociadas con disolución indicadora de fenolftaleína	59
Figura 3. 9: Esquema de corte de una probeta y ubicación de puntos de registro de la profundidad de carbonatación	60

Figura 3. 10: (a y b) Preparación de muestras para MEB, (c) muestras a ensayar, (d) muestras revestidas de oro, (e) máquina para recubrimiento por pulverización catódica DESK II DENTON VACUUM y (f) equipo de microscopía de barrido JEOL JSM 5900LV	61
Figura 4. 1: Profundidad de carbonatación en probetas con distintos porcentajes de filler calcáreo	62
Figura 4. 2: Profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0	63
Figura 4. 3: MEB de probeta con 25% de CCA ARROZUR / F 0.....	63
Figura 4. 4: Profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 0.....	64
Figura 4. 5: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0 y CCA GALOFER / F 0	65
Figura 4. 6: Profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 5	66
Figura 4. 7: Profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 5.....	67
Figura 4. 8: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 5 y CCA GALOFER / F 5	68
Figura 4. 9: Comparación profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0 y CCA ARROZUR / F 5.....	69
Figura 4. 10: Comparación profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 0 y CCA GALOFER / F 5.....	70
Figura 4. 11: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas: CCA Arrozur / F 0, CCA Arrozur / F 5, CCA Galofer / F 0 y CCA Galofer / F 5.....	71
Figura 4. 12: MEB de probeta de Ref. CCA 0 / F 0 que se mantuvo en ambiente de laboratorio	73
Figura 4. 13: MEB de probeta CCA 0 / F 0 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	73

Figura 4. 14: MEB de probetas (a) CCA 0 / F 0 y (b) CCA 0 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	74
Figura 4. 15: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 0 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	75
Figura 4. 16: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	75
Figura 4. 17: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	76
Figura 4. 18: MEB de probeta CCA GALOFER 5 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	77
Figura 4. 19: MEB de probeta CCA GALOFER 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	77
Figura 4. 20: MEB de probeta CCA GALOFER 20 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada	77
Figura 4. 21: MEB de probetas (a) CCA GALOFER 10 / F 5 y (b) CCA GALOFER 25 / F 5 luego de ser expuestas a la cámara de carbonatación acelerada	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1: Tipos de cemento y composición	8
Tabla 2. 2: Profundidades (mm) y Kc (mm/sem-0.5)	15
Tabla 2. 3: Profundidad de carbonatación de las dosificaciones estudiadas.....	22
Tabla 2. 4: Dosificaciones empleadas	24
Tabla 2. 5: Composición y área específica de cementos producidos.....	26
Tabla 2. 6: Profundidad de carbonatación y su correspondiente coeficiente para todas las mezclas.....	38
Tabla 2. 7: Profundidad de carbonatación del hormigón con y sin puzolanas con una resistencia a la compresión a los 28 días en el rango de 40-45 MPa.....	39
Tabla 2. 8: Coeficientes de carbonatación acelerada y natural (REF: I=100).....	43
Tabla 3. 1: Dosificación de los materiales empleados	49
Tabla 3. 2: Características físicas y químicas de los materiales empleados.....	51
Tabla 4. 1: Incremento de la carbonatación en relación a la referencia sin CCA y sin FC.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Å: Angstrom

ACA: Asociación de Cultivadores de Arroz

Al₂O₃: Óxido de aluminio

CaCO₃: Carbonato de calcio

CaO: Óxido de calcio

CaSiO₃: Wollastonita

Ca(OH)₂: Hidróxido de calcio

CCA: Ceniza de Cáscara de Arroz

CO₂: Dióxido de carbono

CP: Cemento Portland

CPC: Cemento Portland Compuesto

CPE: Cemento Portland con Escoria

CPF: Cemento Portland con filler calcáreo

CPN: Cemento Portland Normal

CPP: Cemento Portland Puzolánico

d_k: Profundidad de carbonatación

DRX: Difracción de rayos X

FA: Ceniza volante

FADU: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo

FCIEN: Facultad de Ciencias

Fe₂O₃: Óxido de hierro

FING: Facultad de Ingeniería

GGBS: Escoria granulada de alto horno

HAS: Hectáreas

HR: Humedad Relativa
H₂CO₃: Ácido carbónico
H₂O: Agua
K₂SO₄: Sulfato de potasio
K₂O: Óxido de potasio
MEB: Microscopía Electrónica de Barrido
MgO: Óxido de magnesio
MIP: Porosimetría de Intrusión de Mercurio
MK: Metacaolín
MnO: Óxido de manganeso
Na₂O: Óxido de sodio
Na₂SiO₃: Silicato de sodio
Na₂SO₄: Sulfato de sodio
P₂O₅: Óxido de fósforo
SCM: Materiales de cementíceos suplementarios
SF: Sílice activa
SiO₂: Óxido de silicio
SO₃: Óxido de azufre
TG: Termogravimetría
TON: Toneladas
UdelaR: Universidad de la República
UNIT: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1- INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es un material heterogéneo que, debido a sus múltiples ventajas, entre las que destacan su resistencia mecánica, su durabilidad, versatilidad y plasticidad que permiten confeccionar piezas de formas muy variadas, es ampliamente utilizado en la industria de la construcción a nivel mundial.

El estudio de uno de los factores principales que determinan la vida útil en servicio de una estructura de hormigón armado (Calleja, 1998): la carbonatación, se considera de especial interés.

La carbonatación del hormigón es la reacción del dióxido de carbono (CO_2) existente en la atmósfera (concentración que normalmente es del orden de 0,035%), con los componentes hidratados del Cemento Portland. Sin embargo, cuando el dióxido de carbono (CO_2) está en cantidades mayores, se produce una reacción de carácter agresivo entre la cal de hidrólisis y el dióxido de carbono (CO_2). Éste último penetra por los poros del hormigón y reacciona con los constituyentes alcalinos formando carbonatos de calcio, produciendo una reducción del valor del pH de 12,5 a uno por debajo de 9,5 (Moreno et al, 2004).

La reducción del pH de la capa carbonatada se hace visible por el cambio de color utilizando un indicador de pH apropiado. El indicador de pH más utilizado es una disolución del 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. Esta solución es incolora en pH inferiores a 8,5. Para valores de pH superiores a 9,5 se torna de color púrpura.

Virtualmente todos los elementos constitutivos del Cemento Portland hidratado son susceptibles de carbonatación. Los resultados pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo del tiempo, el porcentaje y la extensión de la carbonatación y del ambiente al cual está expuesto el cemento. La carbonatación puede provocar el deterioro y una disminución del pH de la pasta cementicia, perdiendo así la capa “pasivante” que protege a las armaduras dentro del hormigón.

La corrosión del acero utilizado para la confección del hormigón armado generalmente se inhibe debido a una fina capa de óxido en la superficie del acero que se mantiene estable en ambientes alcalinos como el hormigón. Sin embargo, esa capa de óxido protectora puede desaparecer si el hormigón se torna menos alcalino como resultado de la carbonatación (Parrott, 1987).

La reacción del Cemento Portland hidratado con el dióxido de carbono (CO_2) del aire es generalmente un proceso lento (Ludwig, 1980). Este proceso depende de varios factores tanto climático/ambientales, como la humedad relativa ambiente, la temperatura, la concentración de dióxido de carbono (CO_2), como de características físicas del material, como la permeabilidad del hormigón. Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera insignificante (Verbeck, 1958). Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de dióxido de carbono (CO_2).

Los hormigones relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los hormigones densos, bien compactados y curados. Una menor relación agua/cemento y una buena compactación reducen la permeabilidad y limitan la carbonatación a la superficie. En las áreas industriales, donde hay mayor concentración de dióxido de carbono (CO_2) en el aire, las tasas de carbonatación pueden ser mayores.

Dado que, como se mencionó anteriormente, el proceso de carbonatación natural es lento, para poder obtener resultados a corto plazo se requiere acelerar el proceso. Anteriormente se realizaron estudios sobre carbonatación en morteros de cemento, en períodos acotados de tiempo ya que nuestro país no contaba con una cámara de carbonatación acelerada (Chiecchi, 2010). Recientemente, la Facultad de Ingeniería (UdelAR) adquirió una cámara de carbonatación acelerada que se utilizó para el desarrollo de la presente Tesis.

Diversos estudios sobre carbonatación han sido desarrollados dada la importancia respecto a la durabilidad del hormigón (Cabrera et al., 2015; Van den Heede y De Belie,

2015; entre otros). Que a su vez se asocia con la vida útil del material y su repercusión desde el punto de vista económico.

Es por ello que se cree pertinente realizar un estudio sobre el tema para que sirva como un nuevo insumo que ayude a la difusión y el desarrollo de este material, de uso cada vez más extendido, en la industria nacional.

Para mejorar la durabilidad del hormigón pueden utilizarse adiciones. Éstas son materiales inorgánicos que pueden ser inertes o poseer propiedades ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. No deben aumentar sensiblemente la demanda de agua del cemento, ni disminuir la resistencia al deterioro del hormigón o del mortero en ningún caso, ni reducir la protección de las armaduras frente a la corrosión (Norma UNIT 20:2015).

Las adiciones se incorporan con el objetivo de mejorar algunas de las características físicas y/o químicas o conferirle al hormigón algunas especiales. Los beneficios de utilizar adiciones pueden ser tanto funcionales (trabajabilidad, impermeabilidad, durabilidad, resistencia), como económicos y ecológicos.

3

Entre los materiales utilizados como adiciones adquieren especial relevancia aquellos que provienen de residuos ya que se incorporan a nuevos procesos industriales disminuyendo así impactos negativos sobre el medioambiente, desarrollando tecnologías sostenibles. En los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre la utilización de residuos agroindustriales.

Dentro de los residuos agroindustriales producidos en nuestro país destaca, por sus grandes volúmenes de producción, la cáscara de arroz. La industria arrocera utilizó para la zafra 2016/2017 (última publicada), una superficie cultivada de 168.160,25 has, distribuidas mayoritariamente en los departamentos de Treinta y Tres, Rocha, Cerro Largo, Artigas y Tacuarembó, y en menor medida, en Salto, Llavalleja y Rivera, produciendo aproximadamente 1.445.000 toneladas de arroz con cáscara (ACA, 2017).

El volumen residual de cáscara de arroz es aproximadamente un quinto del volumen total por lo que se obtuvieron unas 289.000 toneladas de cáscara de arroz (792 ton/día) para la zafra 2016/2017.

Una forma de reducir el volumen ocupado por los residuos agroindustriales es a través de la quema de los mismos. Cuando se quema la cáscara de arroz se obtiene un nuevo residuo, la ceniza de cáscara de arroz (CCA). La quema implica una reducción a la quinta parte del volumen original por lo que se obtuvieron 57.800 toneladas de CCA (158 ton/día) para la zafra antes mencionada.

Otra característica por la cual este residuo cobra interés es su potencial altamente contaminante cuando su estructura es cristalina (ya que si es amorfa no es perjudicial), debido a su alto contenido de sílice (90%) (Legrand, 1998; Rodríguez de Sensale et al, 2013), por lo que su utilización como parte de procesos productivos repercutirá favorablemente en el cuidado del medioambiente.

1.2. – OBJETIVOS

1.2.1. – OBJETIVO GENERAL

La carbonatación del hormigón es un fenómeno largamente estudiado en el ámbito científico por su relación directa con la vida útil en servicio de una estructura.

El objetivo general del presente trabajo consiste en estudiar los efectos del fenómeno de la carbonatación para el caso específico de los morteros de cemento con adición de dos tipos de CCA residuales generadas en nuestro país.

1.2.2. – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos se plantean:

- Analizar la variación de los valores de profundidad de carbonatación en morteros de cemento con distintos porcentajes de adición de CCA ARROZUR y sin ella.
- Analizar la variación de los valores de profundidad de carbonatación en morteros de cemento con distintos porcentajes de adición de CCA GALOFER y sin ella.

- Comparar los valores de profundidad de carbonatación con los dos tipos de CCA utilizadas en relación a morteros sin CCA.
- Analizar la variación de profundidad de carbonatación en morteros de cemento con distintos porcentajes de CCA y 5% de filler calcáreo (porcentaje óptimo), en la profundidad de carbonatación de morteros de cemento.
- Comparar los valores de profundidad de carbonatación de morteros de cemento sin y con incorporación de CCA de ambos tipos y filler calcáreo.
- Analizar empleando microscopías electrónicas de barrido (MEB), los efectos de la carbonatación en la microestructura de los morteros estudiados.

1.3. – ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo se divide en cinco capítulos. Los temas tratados dentro de cada uno de ellos son:

El primer capítulo consta de la introducción, los objetivos del trabajo, la estructura y el alcance del mismo.

El segundo capítulo incluye el estado del arte en relación a la temática de la tesis: la carbonatación y los efectos del empleo de CCA y filler calcáreo en la carbonatación.

El tercer capítulo describe el planeamiento de la investigación.

En el cuarto capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en la parte experimental.

En el quinto se presentan las conclusiones finales del trabajo, así como sugerencias para trabajos futuros.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas utilizadas y los anexos.

1.4. – ALCANCE DEL TRABAJO

Dado que la carbonatación es un fenómeno que se desarrolla a lo largo de la vida del hormigón, los estudios experimentales anteriormente realizados en nuestro país

(Chiecchi, 2010), presentaban la limitación de no contar con una cámara de carbonatación acelerada, por lo que sólo fue estudiada en probetas de mortero de cemento la carbonatación natural durante 98 días. Para el presente trabajo se utilizó la cámara de carbonatación acelerada con la que cuenta desde 2014 la Facultad de Ingeniería (UdelaR), lo que permitió acelerar el proceso y las probetas permanecieron en la cámara durante 28 días.

Las dosificaciones empleadas en las probetas fueron las de los cementos compuestos del proyecto ANII FSE 2011-1-6476. En él se le agregó a las dos CCA estudiadas 5% de filler calcáreo para mejorar la trabajabilidad ya que la CCA la disminuye notoriamente cuanto más porcentaje se emplea, de allí que en esta Tesis se creyó conveniente estudiar, por un lado, los efectos de cada una de las adiciones empleadas (CCA de ARROZUR y de GALOFER, filler calcáreo) en diferentes porcentajes (0 a 30%), y luego las dosificaciones estudiadas en el Proyecto mencionado (con 0 a 30% de CCA y 5% de filler calcáreo).

En esta Tesis se usaron las dos únicas cenizas de cáscara de arroz que había en Uruguay a la fecha del proyecto (GALOFER y ARROZUR). Se usó un solo Cemento Portland procedente de fábrica estatal y filler calcáreo provisto por la misma empresa al igual que en el proyecto mencionado a los efectos de complementar los estudios realizados en él.

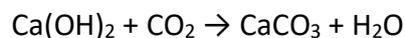
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Esta tesis trata sobre la influencia de la incorporación de CCA y filler calcáreo en morteros de cemento, de allí que primeramente se hará una introducción general a la temática y a continuación se presentará un estado del arte en referencia a la incorporación de CCA y de filler calcáreo al cemento, para lo cual se estudiaron referencias bibliográficas desde 1999 a la fecha.

2.1. – LA CARBONATACIÓN

Dado que en el trabajo final de Diplomado de Chiecchi (2010) se realizó una extensa explicación sobre la carbonatación, en esta tesis se realizará una somera presentación del tema y se profundizará en los efectos que ocasiona en ella la incorporación de CCA y filler calcáreo al cemento.

La carbonatación ocurre cuando el CO₂ en la atmósfera o disuelto en agua reacciona con minerales de cemento hidratados. Collepardi et al. (2004) lo define como:



7

La carbonatación requiere la presencia de agua porque el dióxido de carbono [CO₂] debe disolverse en agua y formar ácido carbónico [H₂CO₃].

La carbonatación del hormigón es una de las causas del deterioro de las estructuras de hormigón armado (Lee et al., 2017).

Según Ayub et al. (2013) la carbonatación está asociada con la corrosión del acero en el hormigón armado. En otras palabras, es la capacidad del hormigón para proteger al acero de la corrosión, dependiendo de la medida en que el hormigón de recubrimiento esté carbonatado.

La Norma UNIT 20:2015 presenta una tabla con los cinco tipos de cemento disponibles en nuestro país (Tabla 2.1).

Tipo de cemento	Designación	Composición (g/ 100g)				
		Componentes principales				Componentes minoritarios
		Clínker	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler Calcáreo (F)	
Cemento portland normal	CPN	100-95				0-5
Cemento portland con filler calcáreo	CPF	94-80			6-20	0-5
Cemento portland puzolánico	CPP	85-50	15-50			0-5
Cemento portland con escoria	CPE	94-65		6-35		0-5
Cemento portland compuesto	CPC	94-65	dos o tres componentes, con P + E + F entre 10 y 35%			0-5

Tabla 2. 1: Tipos de cemento y composición

Podemos observar en ella que el Cemento Portland Normal (CPN) está compuesto principalmente por clínker, mientras que los restantes tipos de cemento tienen lo que la Norma denomina: componentes adicionales, que en la literatura también se llaman adiciones, aditivos minerales o materiales cementíceos suplementarios (SCM) debido a que en la fabricación del cemento se sustituye parte del clínker por ellos.

8

Las adiciones pueden ser inertes o poseer propiedades ligeramente hidráulicas, hidráulicas latentes o puzolánicas. De acuerdo a la Norma UNIT 20:2015 pueden ser fillers (como el filler calcáreo), puzolanas (CCA, sílice activa, cenizas volantes, metacaolín) o escorias (escoria granulada de alto horno). Entre las puzolanas se encuentra la CCA que fue utilizada en esta Tesis de Maestría.

Estos materiales deben estar correctamente seleccionados, homogeneizados, secados y pulverizados, en función de su estado de producción o suministro. No deben aumentar sensiblemente la demanda de agua del cemento, ni en ningún caso disminuir la resistencia al deterioro del hormigón o del mortero, ni reducir la protección de las armaduras frente a la corrosión (UNIT 20:2015).

Los materiales cementíceos suplementarios (SCM) a menudo aumentan la cinética de carbonatación en comparación con los hormigones de referencia hechos de cementos compuestos solo por clínker (Bucher et al., 2017).

Según Neville (2012), el tipo de cemento afecta la profundidad de carbonatación, y el cemento resistente al sulfato tiene 50% mayor carbonatación que el normal (CPN). Los cementos de escoria pueden tener tasas de carbonatación hasta un 200% más que el Cemento Portland, y los cementos de cenizas volantes también tienen tasas de carbonatación más altas que el Cemento Portland Normal (CPN).

Bijen et al. (1989) compararon la carbonatación de hormigones hechos de diferentes cementos expuestos a condiciones de laboratorio (20° C, HR = 65%) y al aire libre. Los hormigones con cemento de escoria carbonataron más rápido que los hormigones hechos con Cemento Portland en condiciones de laboratorio, pero en la exposición al exterior, más húmedo, los dos tipos de hormigón tuvieron un desempeño similar. Reemplazar el 25% de cualquiera de estos cementos con una masa igual de ceniza volante (FA) aumentó la tasa de carbonatación, y la combinación de ceniza volante y escoria tuvo el peor rendimiento.

Osborne (1989) investigó estructuras hechas con Cemento Portland con y sin escoria al 50% o 70%. El contenido total de cemento estuvo en el rango de 360-380 kg/m³. Con aproximadamente cinco años de exposición, las profundidades de carbonatación fueron mayores para hormigones con escoria al 70%. Los hormigones de Cemento Portland mostraron poca o ninguna señal de carbonatación después de una exposición de 7 a 17 años.

Kokubu y Nagataki (1989) indicaron que los datos de 20 años sobre la exposición al exterior de hormigones en varios lugares de Japón muestran que la profundidad de carbonatación aumenta con la relación agua/cemento y nivel de reemplazo de ceniza volante (FA) del cemento. La carbonatación también aumenta con la reducción en el contenido total de material cementoso.

Campbell et al. (1991) examinaron losas de hormigón expuestas al aire libre y a sales para determinar el grado de carbonatación. También descubrieron que los hormigones con ceniza volante (FA) habían aumentado la profundidad de carbonatación en comparación con las muestras de control.

Skjolsvold (1986) investigó las profundidades de carbonatación de hormigones con y sin sílice activa (SF). La profundidad media de carbonatación fue mayor para los hormigones con sílice activa (SF), pero la variación fue bastante alta. Los estudios de laboratorio mostraron que, para una resistencia a la compresión dada, el hormigón con sílice activa (SF) tenía mayores tasas de carbonatación que el hormigón sin adiciones.

Grirnaldi et al. (1989) encontraron que la profundidad de carbonatación era mayor en los morteros que contenían sílice activa (SF) que en los morteros de control. Atribuyen este resultado a la reducción del pH causada por la reacción puzolánica.

Khunthongkeaw et al. (2006) estudiaron la carbonatación del hormigón utilizando dos tipos de ceniza volante (FA) con diferentes contenidos de óxido de calcio (CaO) y descubrieron que la carbonatación es más alta cuando las muestras están expuestas a las condiciones naturales. Además, al disminuir la relación agua/aglomerante y el contenido de ceniza volante (FA), se puede obtener una mejor resistencia a la carbonatación. De manera similar, el hormigón que contiene alto CaO + FA resiste mejor la carbonatación que los de bajo CaO + FA; sin embargo, la resistencia del hormigón será igual mostrando que el efecto del tipo de ceniza volante (FA) en la carbonatación no influye en las propiedades mecánicas del hormigón.

Kim et al. (2007) estudiaron la durabilidad del hormigón con metacaolín (MK), utilizando varios reemplazos de sílice activa (SF) y metacaolín (MK) y se realizaron pruebas rápidas de permeabilidad al cloruro, prueba de inmersión en solución ácida, prueba repetida de congelación y descongelación y prueba de carbonatación acelerada. La profundidad de carbonatación del hormigón es mayor que en la mezcla de control (sin adiciones) en el caso de sílice activa (SF) o metacaolín (MK). También demostró un aumento en la profundidad de carbonatación con el aumento del nivel de reemplazo. La razón de este aumento en la profundidad de carbonatación es que el hormigón con metacaolín (MK) o sílice activa (SF) posee menor contenido de portlandita en productos de hidrato debido a la reacción puzolánica.

Como conclusión se observa que, al igual que el tipo de Cemento Portland afecta la profundidad de carbonatación (Neville, 2012), el empleo de materiales cementíceos

suplementarios en el Cemento Portland también afecta la profundidad de carbonatación. La incidencia es distinta para cada uno de ellos por lo presentado anteriormente, de allí que en la sección siguiente se profundizará en los efectos de la incorporación de CCA y/o filler calcáreo en la carbonatación de los cementos y hormigones.

2.2. – INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE CCA Y/O FILLER CALCÁREO EN MATERIALES CEMENTÍCEOS

Año: 1999

Título del Artículo: “The reaction between rice husk ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution and the nature of its product”

Autores: Qijun Yu, K. Sawayama, S. Sugita, M. Shoya, Y. Isojima

Revista: Cements & Concrete Research 29 (1999); 37-43.

El estudio fue hecho en base a difracciones de rayos X, MEB y otros ensayos químicos concluyendo que:

- A temperaturas cercanas a 40°C y en presencia de agua, la CCA puede reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar un tipo de gel fino de C-S-H [$\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\cdot x\text{H}_2\text{O}$]. El tamaño de la partícula del producto de reacción tiene un diámetro promedio entre 4.8 y $7.9 \mu\text{m}$.
- El C-S-H tiene una morfología de flóculos, con una estructura porosa y una gran superficie específica. Los poros en el gel varían entre 10 y 100 \AA con un radio promedio de aproximadamente 20 \AA .
- Cuando el producto se calienta, pierde gradualmente el agua que contiene, pero mantiene una forma amorfa hasta los 750°C . Por encima de los 780°C se transforma en wollastonita cristalina [CaSiO_3].
- Una de las razones principales de la mejora de las propiedades del hormigón, como la resistencia al ataque ácido, carbonatación y la penetración, al agregar CCA al hormigón, posiblemente se puede atribuir a la formación de más C-S-H y menos portlandita debido

a la reacción que ocurre entre la CCA y los iones Ca^{2+} y OH^- , o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el cemento hidratante.

La CCA utilizada por los autores era mayoritariamente amorfa y altamente puzolánica. Los autores indican que el contenido de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ en la pasta de la CCA, producida al reemplazar 30% de CCA con Cemento Portland Normal (CPN), comenzó a disminuir después de 3 días de curado, y fue alrededor de cero luego de 90 días de curado. Basados en los resultados experimentales, los autores encontraron que las pastas con CCA contienen más C-S-H y menos portlandita en comparación con las pastas elaboradas con Cemento Portland Normal (CPN) únicamente, lo que podría explicar la mejora en la resistencia a la carbonatación cuando se emplea CCA.

Año: 2000

Título del Artículo: "Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar"

Autores: S. Tsivilis; G. Batis; E. Chaniotakis; Gr. Grigoriadis; D. Theodossis

Revista: Cements & Concrete Research 30 (2000); 1679-1683.

12

Los autores estudiaron las propiedades y el comportamiento de morteros y hormigón con adición de filler calcáreo al CP. Los cementos con distinto contenido y finura de filler calcáreo se produjeron sustituyendo clínker, por filler calcáreo. Para obtener resultados compatibles, los cementos producidos se seleccionaron para tener la misma resistencia. El cemento con contenido de hasta un 20% de filler calcáreo, presentó resultados satisfactorios de resistencia y trabajabilidad del hormigón, mientras que la capacidad de absorción y la permeabilidad al cloruro fueron similares al hormigón con CP sin adiciones. Los hormigones con cemento con incorporación de filler calcáreo fueron menos resistentes al hielo-deshielo en comparación a los hormigones con CP sin adiciones. El Cemento Portland con 20% de filler calcáreo, presentó una óptima protección contra la corrosión del acero del hormigón armado.

En este trabajo, la medición de la carbonatación fue hecha en probetas sometidas a los estudios de corrosión después de 9 y 12 meses, usando el indicador de fenolftaleína rociado en una sección transversal del espécimen, lo cual no es el procedimiento

seguido por normas, recomendaciones u otros investigadores que han publicado trabajos relativos a carbonatación, y concluyen que el empleo de filler calcáreo disminuye el espesor carbonatado.

Año: 2004

Título: “The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes”

Autores: M. Collepari; S. Collepari; J.J. Ogoumah Olagot; F. Simonelli

Conferencia: Proc. Of 8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, (2004); 23-29.

Los autores compararon el efecto de distintas adiciones (ceniza volante, escoria y filler calcáreo), como reemplazo parcial del Cemento Portland en la penetración de CO₂ y descubrieron que la incorporación de adiciones aumenta la profundidad de carbonatación en los hormigones, excepto cuando la cantidad de reemplazo de cemento está por debajo de 15% (Figura 2.1).

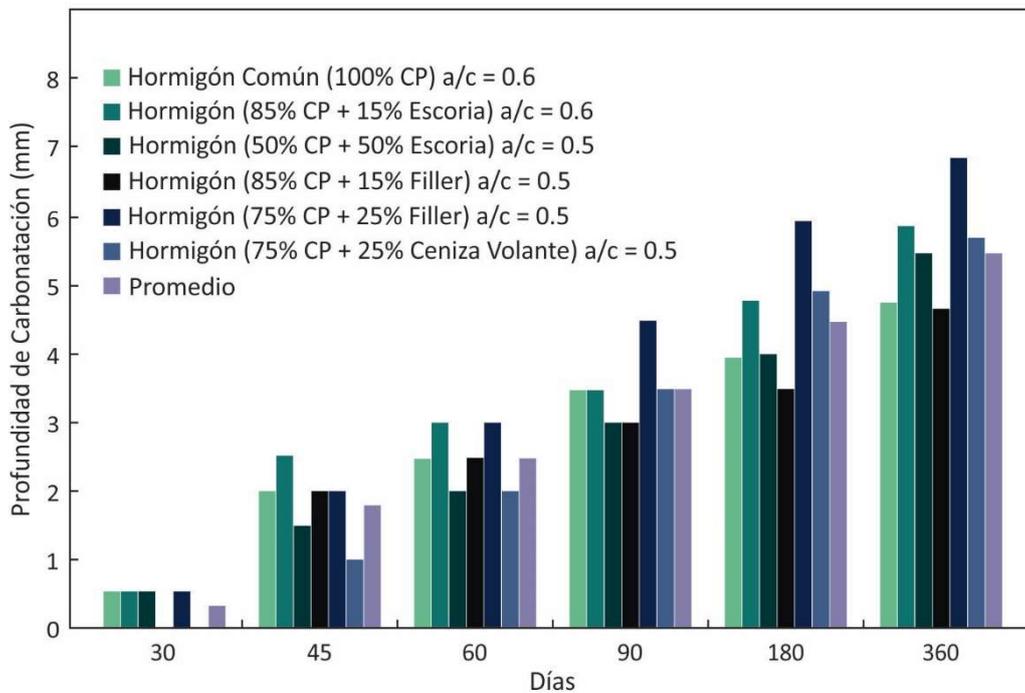


Figura 2. 1: Profundidad de carbonatación de hormigones con cementos parcialmente reemplazados por escoria, filler calcáreo y ceniza volante

Año: 2005

Título de la Tesis Doctoral: “Estudo da corrosão de aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais”

Autor: M.A. Vaghetti

Universidad: Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiales, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

El autor expresa que de acuerdo a la literatura sobre el tema, las adiciones minerales cuando se incorporan al hormigón sustituyendo parcialmente al cemento portland, aumentan la carbonatación, especialmente por consumir más CH a través de las reacciones puzolánicas, disminuyendo la reserva alcalina que va posteriormente a reaccionar con el CO₂ para formar carbonatos, en el proceso de carbonatación; afirma también que muchas investigaciones demuestran el hecho del aumento de la carbonatación de hormigones, morteros y pastas con ceniza volante (FA), pero también con otras adiciones minerales como la sílice activa (SF), la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y la escoria granulada de alto horno (GGBS).

14

Específicamente Isaia et al. (2000) en mezclas binarias con 25% y 50% de CCA, para una relación agua/aglomerante de 0.55 a los 28 días, verificaron aumentos en los coeficientes de carbonatación en comparación a hormigones de referencia en la misma situación aproximadamente de 3 y 10 veces respectivamente. Estudios realizados por Nascimento et al. (2002) investigaron la profundidad de carbonatación de hormigones con 5% y 10% de sustitución de cemento por CCA en relaciones agua/aglomerante de 0.50 y 0.60; durante 42 días las probetas se sometieron a ensayos de carbonatación acelerada con 5% de CO₂; con la relación agua/aglomerante de 0.50 los hormigones no presentaron carbonatación mientras que con la relación agua/aglomerante de 0.60 las profundidades carbonatadas fueron de 3mm, 6mm y 8mm respectivamente para los hormigones de referencia, con 5% de CCA y con 10% de CCA.

En la Tesis el autor determina la profundidad de carbonatación en ensayos acelerados de prismas de 75mm x 75mm x 50mm curados 24 horas en el molde, 48 días en cámara húmeda y 42 días en cámara climatizada (pre-acondicionamiento); después de

completar los 91 días las probetas fueron colocadas en cámara de carbonatación acelerada con 10% CO₂ en volumen. Se determinaron los espesores carbonatados a las 4, 8, 12, 16 y 20 semanas de permanencia en la cámara, siendo en esas edades fracturadas las probetas en prensa por compresión, luego se limpiaba cada mitad retirando partículas sueltas y recibían aspersion de solución de fenolftaleína a 1%. Después se leía la profundidad carbonatada de cada cara con un paquímetro digital. El espesor carbonatado, en mm, era la media aritmética de las lecturas de los cuatro (4) lados retirando valores espurios. La Tabla 2.2 presenta los resultados obtenidos siendo TR las mezclas de referencia sin adiciones, VB las mezclas con sustitución de 25% de Cemento Portland por ceniza volante, VA las mezclas con sustitución de 50% de Cemento Portland por ceniza volante, A las mezclas con sustitución de 25% de Cemento Portland por CCA, y E las mezclas con 70% de sustitución de Cemento Portland por escoria granulada de alto horno. En la Tabla CARB significa que los valores son mayores o iguales a 25mm, ND no determinado, *valores obtenidos mediante regresión lineal, **valores estimados, - representa la inexistencia de probetas para el ensayo.

Mezcla	a/agl.	4 sem.	8 sem.	12 sem.	16 sem.	20 sem.	Kc
TR	0.50	0.20*	0.50	-	2.27	-	1.07
	0.58	2.61	3.84	7.20	11.86	ND	4.53
	0.69	3.28	8.85*	13.93	25.05*	CARB.	10.33
VB	0.51	3.17*	9.45	-	16.42	-	6.58
	0.60	9.14	16.91	22.68	CARB.	CARB.	9.25
	0.70	15.77	25.20*	CARB.	-	CARB.	11.38**
VA	0.49	13.90*	19.70	-	CARB.	-	6.93**
	0.60	21.90	CARB.	CARB.	CARB.	CARB.	10.90**
	0.69	30.05*	-	CARB.	-	CARB.	14.90**
A	0.51	7.54*	9.34	-	11.15	-	1.79
	0.61	10.64	13.86	21.69	CARB.	CARB.	7.37
	0.70	13.86	18.77*	CARB.	-	CARB.	10.60**
E	0.50	8.95*	9.53	-	13.10	-	2.14
	0.60	13.24	16.62	20.18	CARB.	CARB.	4.71
	0.69	17.87	25.46*	CARB.	-	CARB.	9.16**

Tabla 2. 2: Profundidades (mm) y Kc (mm/sem-0.5)

A partir de las profundidades de carbonatación (mm) y las edades de lectura de la carbonatación mediante regresión lineal simple se calcularon los coeficientes de carbonatación acelerada K_c para cada una de las mezclas y relaciones agua/aglomerante. La Figura 2.2 presenta la evolución de esos coeficientes para las cinco (5) mezclas analizadas.

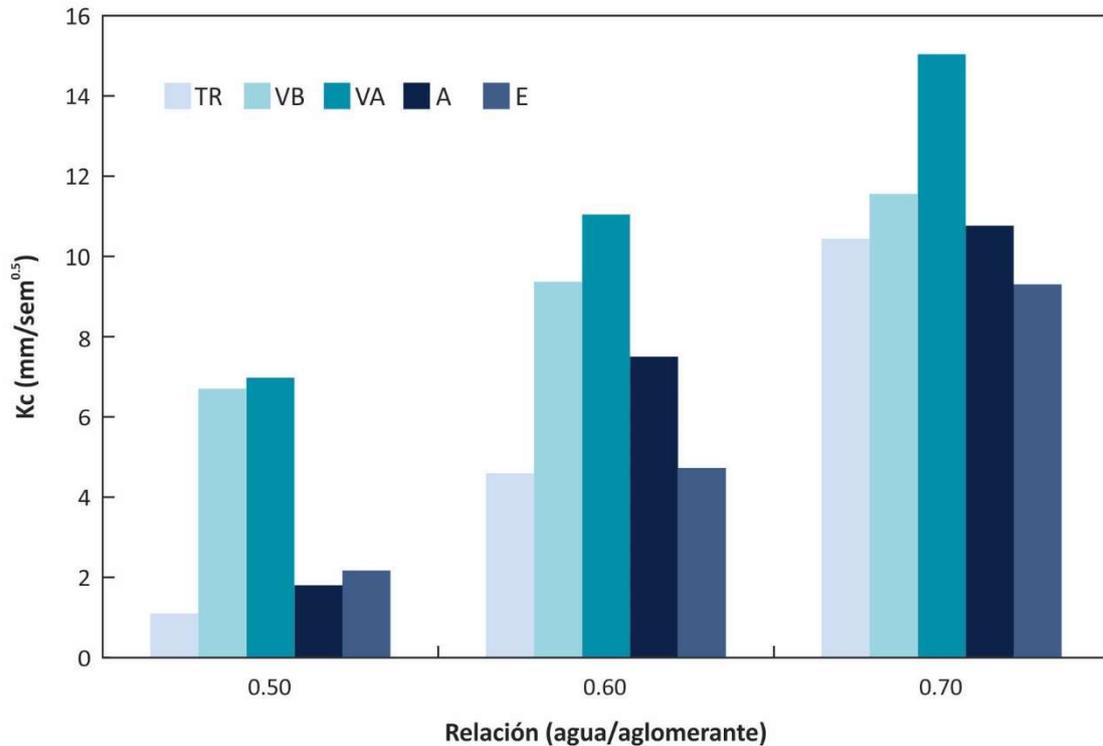


Figura 2. 2: Coeficientes de carbonatación acelerada K_c

La Figura permite verificar la mayor velocidad de carbonatación de las probetas con ceniza volante para las 3 relaciones agua/aglomerante estudiadas, mostrando que esta adición es más susceptible de carbonatar que las otras. Las probetas con escoria de alto horno presentaron el mejor desempeño a la carbonatación en comparación con las otras adiciones minerales para las relaciones agua/aglomerante de 0.60 y 0.70.

En relación a las probetas con CCA presentaron mayor coeficiente de carbonatación en todas las relaciones agua/aglomerante estudiadas que la referencia sin adiciones.

Año: 2007

Título del Artículo: "Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators"

Autores: A.L.G. Gastaldini; G.C. Isaia; N.S. Gomes; J.E.K. Sperb

Revista: Cements & Concrete Composites 29 (2007); 176-180.

Los autores examinaron el papel de los activadores químicos en la resistencia a la compresión, penetración de cloruros y carbonatación de morteros que contiene 20% de CCA como reemplazo parcial del cemento. Las relaciones agua/aglomerante utilizadas fueron 0.35, 0.50 y 0.65 y las relaciones aglomerante/agregado fueron 1:3,75, 1:5,25 y 1:6,9. El sulfato de potasio [K_2SO_4], el sulfato de sodio [Na_2SO_4] y el silicato de sodio [Na_2SiO_3] se utilizaron como activadores químicos en concentraciones de 1% en peso de cemento. Muestras de 100×100 mm se curaron durante 28 días. Su superficie superior fue sellada y se sometieron a un ciclo de pre-acondicionamiento según RILEM TC116-PCD (1999), que trata sobre permeabilidad a gas y nada tiene que ver con la carbonatación. Luego se colocaron en una cámara de atmósfera controlada con 5% de CO_2 , ($t = 23 \pm 1^\circ C$ y $HR = 65 \pm 1\%$). La profundidad de carbonatación se midió a diferentes tiempos de exposición, 4, 8 y 12 semanas respectivamente, mediante la prueba de fenolftaleína realizada en la sección dividida transversalmente de las muestras de los cilindros utilizando el método RILEM CPC18 (1988).

La mezcla de 20% de CCA y 1% de K_2SO_4 mostró coeficientes de carbonatación más bajos que en las muestras de referencia para relaciones agua/cemento = 0.65. Se sabe que el uso de relaciones agua/cemento más bajas es beneficioso para el hormigón, por lo tanto, es mejor usar la mezcla sin activadores químicos.

En el caso de las muestras sin activadores con 20% de CCA, se puede observar en la Figura 2.3 que con relaciones agua/cemento = 0.5, se tiene mayor carbonatación que en las muestras de referencia sin CCA. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en la campaña experimental realizada para esta Tesis de Maestría.

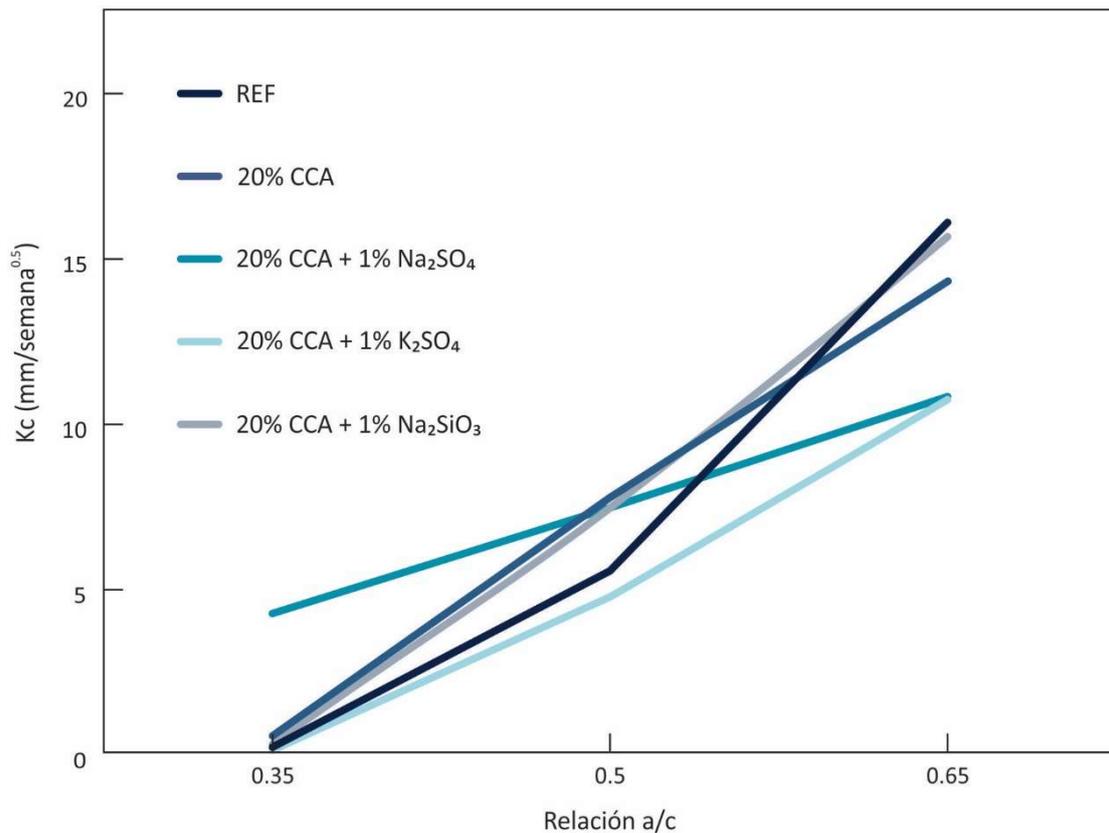


Figura 2. 3: Profundidad de carbonatación en referencia a las relaciones agua/cemento (Gastaldini et al., 2007)

Año: 2007

Título del Artículo: "Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction"

Autores: R.K. Dhir; M.C. Limbachiya; M.J. McCarthy; A. Chaipanich

Revista: Materials and Structures 40 (2007); 459-473.

En el artículo, los autores describen un estudio llevado a cabo para examinar el desempeño del hormigón producido utilizando combinaciones de Cemento Portland (CP) y filler calcáreo (FC), con diferentes porcentajes de sustitución de CP por FC cubriendo los rangos indicados para Cemento Portland con filler calcáreo (CPF) de acuerdo a norma europea (hasta 45% de FC).

En particular, estudiaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones. Los resultados que presentan en el artículo indican diferencias mínimas en el comportamiento entre hormigones con CP y con 15% de FC con igual relación agua/cemento (cemento = Cemento Portland + adición). Sin embargo, observaron efectos adversos en muchas propiedades al aumentar el contenido de FC más allá del 15% del contenido de cemento.

Cabe observar que, si bien en este trabajo los autores usaron como mínimo 15% de FC, existe un acuerdo general en la literatura que a niveles de hasta 5%, hay poco impacto del FC sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido, y ello fue tenido en cuenta en esta Tesis de Maestría cuando se combinó CCA con FC, utilizándose un 5%.

En este artículo, los autores utilizaron (i) prismas de 100 x 100 x 500 mm que fueron almacenados en ambiente con 0,035% de CO₂, t = 20° C, HR = 65% y (ii) cubos de 100 mm, que fueron ingresados a cámara de carbonatación acelerada (4% de CO₂, t = 20° C, HR = 65%). En ambos casos, la profundidad de carbonatación se midió dividiendo las muestras de prueba y rociando la superficie expuesta con una solución indicadora de fenolftaleína. Se realizaron mediciones a 1 año para el caso de los prismas (i) y 20 semanas para los cubos (ii) que ingresaron a cámara de carbonatación.

En la Figura 2.4 (a) se observa que para cementos con un 15% de FC, no hubo una influencia perceptible en la resistencia a la carbonatación del hormigón con 1 año de exposición en todas las relaciones agua/cemento utilizadas. La máxima diferencia entre muestras con CP y las que contienen un 35% de FC fue de 5.0 mm, y esto podría ser un problema para estructuras con un largo diseño de vida útil (120 años). En la Figura 2.4 (b) se observa que la resistencia a la carbonatación de los hormigones con CP común y con incorporación de FC aumentó con la resistencia y, aunque las curvas generalmente siguieron una relación similar, se compensaron ligeramente.

Concluyen los autores que el proceso de carbonatación está influenciado por la microestructura del hormigón y por las reacciones químicas del ácido carbónico con los componentes alcalinos, y por ello las tendencias observadas en el artículo reflejan los efectos de los cambios de contenido de CP y FC calcáreo en estos.

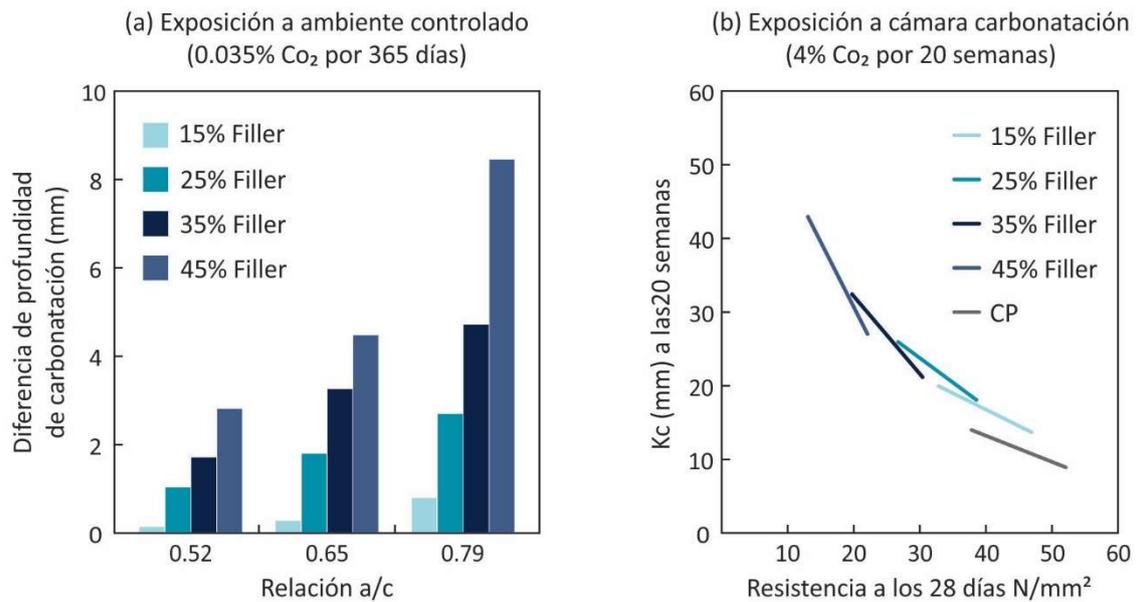


Figura 2. 4: Comparación de resistencia a la carbonatación de hormigones con CP y con CP con incorporación de filler calcáreo (a) relación a/c y (b) resistencia a los 28 días (cámara de carbonatación) (curado en agua a 20°C)

Año: 2007

Título del Artículo: “The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete”

Autores: K.J. Mun; S.Y. So; Y.S. Soh

Revista: Construction and Building Materials 21 (2007); 1576-1582.

Los autores estudiaron los efectos de diferentes activadores en morteros y hormigones realizados con cementos en base a escoria de alto horno, debido a que, si bien con estos cementos en muchas propiedades se tienen buenos resultados, presentan problemas en otras como ser el aumento de la carbonatación, tema de la presente Tesis de Maestría. Uno de los activadores estudiados es el filler calcáreo al cual denominan I.

Cabe observar de este trabajo que al considerar CP en base a escoria de alto horno, los constituyentes de ese CP son clínker y escoria. Al agregarle un activador, como ser el filler calcáreo, se tiene una mezcla ternaria (CP + escoria + filler calcáreo).

En el trabajo se estudiaron solamente los efectos de la carbonatación en hormigones. En la Figura 2.5 se presentan los resultados del espesor de penetración de la carbonatación en hormigones realizados con cemento en base a escoria con 2,5% de filler calcáreo (I) y sin activador (A), se comparan los resultados con hormigones realizados con Cemento Portland Normal (C). Se observa claramente que en todas las edades estudiadas el hormigón en base a escoria granulada de alto horno (GGBS) presenta los valores más altos de espesor carbonatado, cuando se le incorpora como activador filler calcáreo (FC) la carbonatación baja siendo más bajo el espesor carbonatado incluso que el del hormigón realizado con Cemento Portland Normal (C).

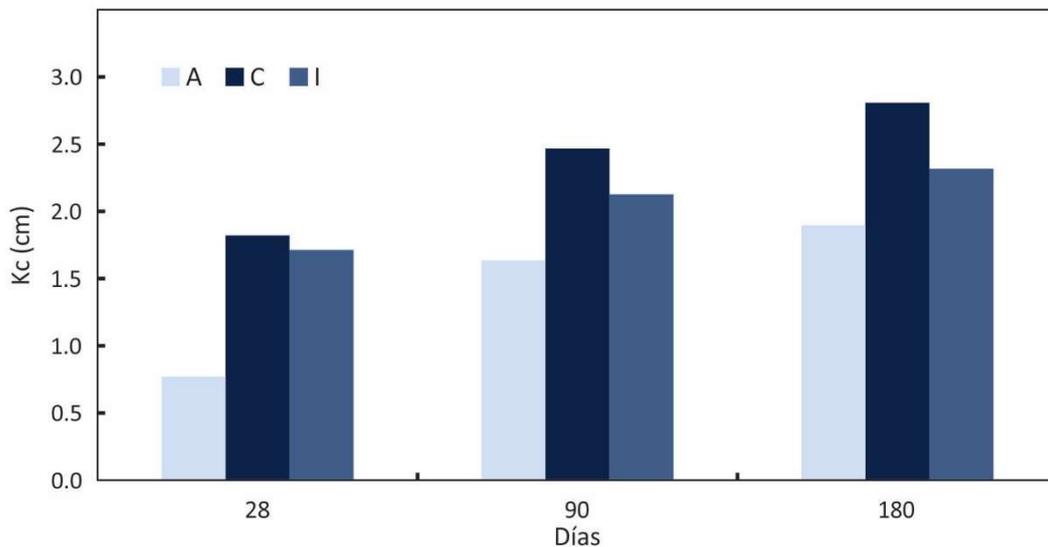


Figura 2. 5: Comparación de profundidades de carbonatación con activadores añadidos (I), sin activador (A) y con CP común (C)

En relación a la carbonatación, en el trabajo se concluye que cuando se agregan pequeñas cantidades de activadores al cemento en base a escoria de alto horno, decrece el espesor carbonatado.

Año: 2008

Título de la Tesis de maestría: “Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem”

Autor: A.E. Hoppe

Universidad: Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Brasil

La tesis formó parte de un proyecto PROSUL, conjunto entre Brasil, Argentina y Uruguay, cuyo objetivo era evaluar la viabilidad técnica del empleo de CCA residual natural (sin molienda) en hormigones para fines estructurales. En esa Tesis de Maestría se evaluó la profundidad de carbonatación para hormigones con porcentajes de sustitución de 15% y 25% de cemento por CCA residual sin molienda y con molienda, comparándose los resultados con hormigones de referencia sin CCA. Se usaron tres relaciones agua/aglomerante (0.45, 0.55 y 0.65 respectivamente). En la Tabla 2.3 se presentan los resultados de profundidad de carbonatación, en mm, obtenidos de ensayos de carbonatación acelerada después de 3, 6, 9 y 12 semanas de exposición a 5% de CO₂, con 75% de humedad relativa y temperatura de 20° C.

Mezcla	agua/agl.	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
		carbonat. (mm)	carbonat. (mm)	carbonat. (mm)	carbonat. (mm)
		3 Sem.	6 Sem.	9 Sem.	12 Sem.
REFERENCIA	0.45	2.99	3.53	5.85	6.53
	0.55	3.61	5.43	8.12	9.25
	0.65	5.33	6.55	11.43	12.63
15% CCA NATURAL	0.45	3.21	5.05	7.03	7.74
	0.55	5.52	7.80	8.99	11.77
	0.65	7.43	9.15	12.56	13.37
15% CCA MOLIDA	0.45	3.22	4.05	6.01	6.76
	0.55	4.77	7.15	9.47	10.87
	0.65	6.12	9.04	11.85	13.55
25% CCA NATURAL	0.45	4.82	6.90	8.92	11.25
	0.55	7.45	8.85	11.44	16.14
	0.65	10.66	13.20	19.02	24.20
25% CCA MOLIDA	0.45	4.55	6.02	8.38	9.06
	0.55	6.15	8.48	11.37	12.68
	0.65	8.64	11.61	13.63	17.18

Tabla 2. 3: Profundidad de carbonatación de las dosificaciones estudiadas

La Figura 2.6 presenta las profundidades de carbonatación para cada relación agua/aglomerante estudiada luego de 12 semanas de exposición al CO₂.

Mediante la Tabla 2.3 y de la Figura 2.6 se visualiza en los hormigones de referencia sin CCA menores espesores de carbonatación que con CCA natural y molida, siendo a su vez menor el espesor carbonatado en las probetas con CCA molida que natural; se verifica en ellas un aumento de la profundidad de carbonatación para hormigones con la incorporación de CCA en comparación al de referencia sin CCA, en la faja de 4% a 72% para la relación agua/aglomerante de 0.45, un incremento de 18% a 74% para 0.55 y un aumento de 6% a 92% para la relación agua/aglomerante de 0.65.

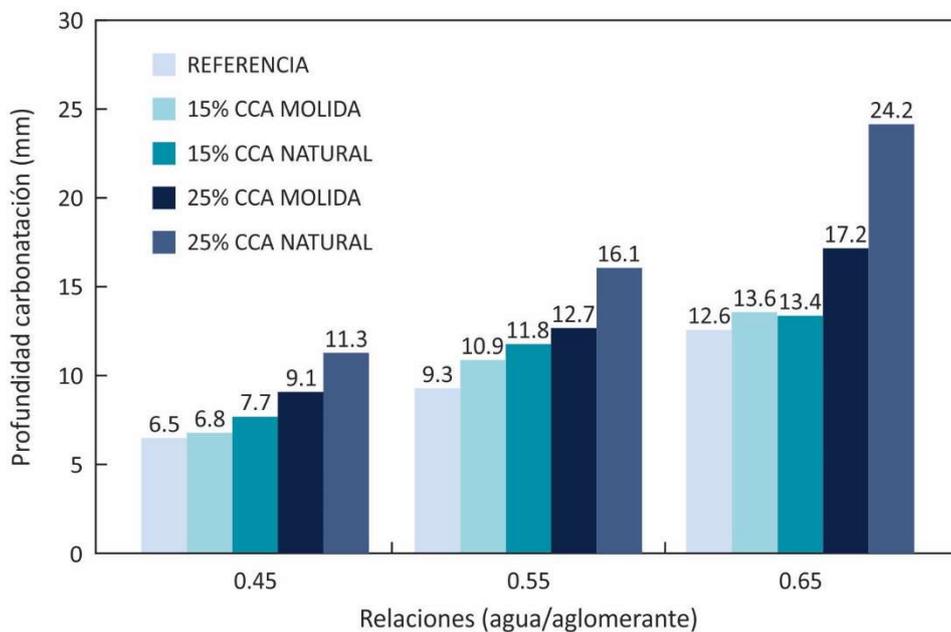


Figura 2. 6: Profundidad de carbonatación a las 12 semanas

Año: 2009

Título del Artículo: “Pore Structure Changes of Blended Cement Pastes Containing Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash Caused by Carbonation”

Autores: P. Chindaprasirt; S. Rukzon

Revista: Journal of Materials in Civil Engineering 21 (11); 666-671.

Debido a que es sabido que la carbonatación, como consecuencia de la transformación de Ca(OH)_2 en CaCO_3 , altera la microestructura de la pasta de cemento al disminuir la porosidad, en este trabajo se investigaron los efectos de la carbonatación en la

estructura de los poros de las pastas de Cemento Portland Puzolánico (CPP). El Cemento Portland Normal (CPN) se reemplazó parcialmente con cenizas de combustible de aceite de palma molido (POA), ceniza de cáscara de arroz (CCA) y ceniza volante (FA). La Tabla 2.4 presenta las dosificaciones empleadas en este trabajo.

Mezcla	CPN	FA	POA	CCA	Superplastificante (%)*
CPN	100	-	-	-	1.8
20% FA	80	20	-	-	0.4
40% FA	60	40	-	-	0.2
20% POA	80	-	20	-	1.8
40% POA	60	-	40	-	3.0
20% CCA	80	-	-	20	2.0
40% CCA	60	-	-	40	3.4

*Nota: Superplastificante (%) por peso de aglomerante.

Tabla 2. 4: Dosificaciones empleadas

En el trabajo se ensayó la resistencia, la porosidad total, el área de superficie específica y la distribución del tamaño de poro. En general, la incorporación de puzolanas aumentó la porosidad total de las pastas de cemento compuesto (CPP) en comparación con la de la pasta de CPN. La carbonatación de pastas con 5% de CO₂ y 50% de humedad relativa (HR) durante 28 días dio como resultado el llenado de los poros y el posible ataque al silicato de calcio hidrato (C-S-H) dependiendo del tipo de puzolana utilizada. Después del ensayo de carbonatación, la porosidad total disminuyó y las áreas superficiales específicas de las pastas de cemento puzolánico (CPP) se redujeron, lo que indica el llenado de huecos. Las distribuciones de tamaños de poros de las pastas con POA y CCA fueron diferentes a las de las pastas con FA (Figura 2.7). Se incrementaron los poros grandes con una correspondiente disminución de poros pequeños indicando ataque contra el C-S-H en las pastas carbonatadas que contenían POA y CCA. Los autores concluyen que es posible que la POA y CCA utilizadas sean altamente reactivas y, por lo tanto, su uso dio como resultado una mayor carbonatación en comparación con el uso de FA.

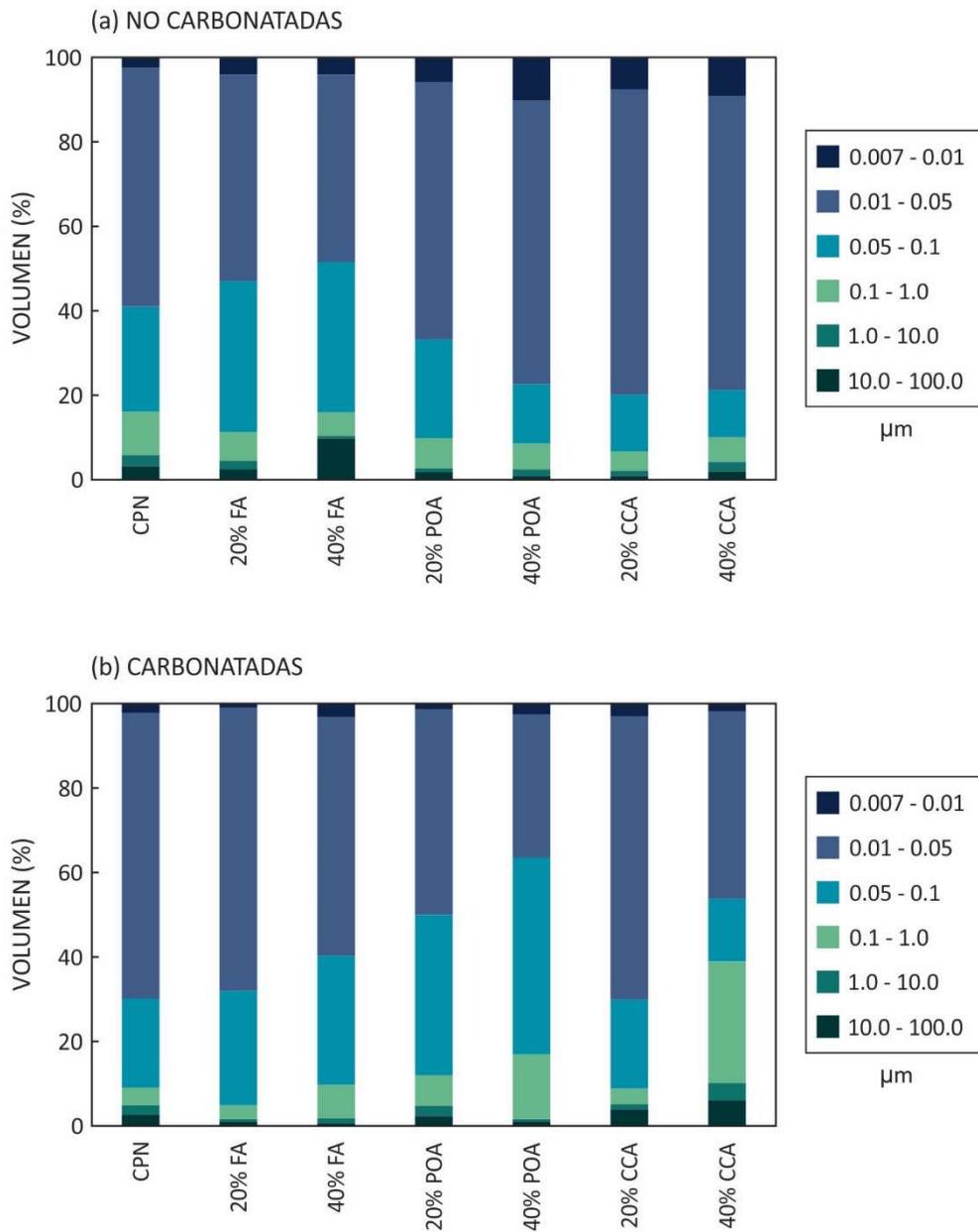


Figura 2. 7: Clasificación de poros de pastas (no carbonatadas y carbonatadas)

Año: 2009

Título del Artículo: “Study of the hydration process of quaternary blended cements and durability of the produced mortars and concretes”

Autores: P. Pipilikaki; M. Katsioti

Revista: Construction and Building Materials 23 (2009); 2246-2250.

Los autores proponen aclarar el efecto que tienen los cementos compuestos por cuatro componentes (mezclas cuaternarias constituidas por: clínker + ceniza volante + puzolana natural + filler calcáreo), sobre el proceso de hidratación y durabilidad del hormigón. Produjeron cementos con dos proporciones diferentes de ceniza volante (FA) con alto contenido de calcio, puzolana natural y filler calcáreo, que se han comparado con Cemento Portland Normal (CPN).

La resistencia a la compresión se midió a diferentes edades y la cinética de hidratación se estudió mediante resonancia magnética nuclear de protones (RMN-H). Además, los cementos fueron utilizados para producir morteros y hormigones y con ellos determinaron su durabilidad.

Uno de los aspectos de durabilidad estudiados en el trabajo fue la carbonatación. Para ello se midió la carbonatación del hormigón con una relación a/c = 0.6 que permaneció un día en el molde y seis días en una solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y luego se mantuvo dentro de cámara de carbonatación con 1% de concentración de CO_2 , temperatura 20° C y HR 70% durante 28, 56, 90, 180, 365 días (1 año) y 730 días (2 años) utilizando el método de fenolftaleína.

En la Tabla 2.5 se presenta la composición y finura de los cementos utilizados en el trabajo en los que QBC1 y QBC2 tienen 8 y 15% de piedra calcárea que, al molerse conjuntamente con el clínker y los otros componentes del cemento, quedará como filler calcáreo.

	CPN	QBC1	QBC2
Ceniza volante (%)	0	6	15
Puzolana (%)	0	17	12
Filler calcáreo (%)	0	8	15
Clínker (%)	95	66	55
Yeso (%)	5	4	3
Finura Blaine (cm^2/g)	2660	4660	5240

Tabla 2. 5: Composición y área específica de cementos producidos

Los resultados de carbonatación obtenidos por los autores se muestran en la Figura 2.8. Allí se observa que en el primer período de exposición al CO₂ (hasta 180 días), los tres hormigones presentaron aproximadamente la misma profundidad de carbonatación, mientras que después de esa edad, las mezclas cuaternarias presentaron mayor carbonatación que el cemento común sin adiciones (CPN).

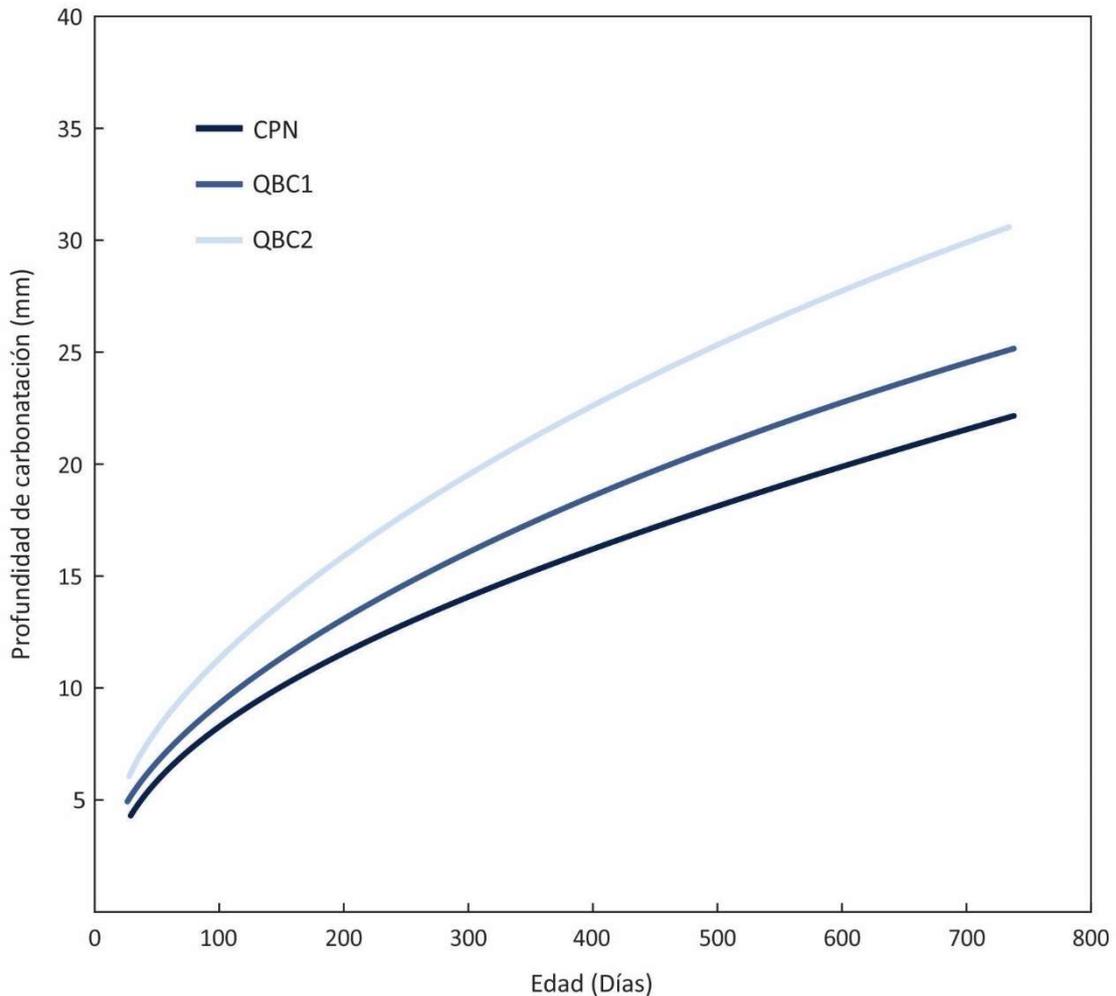


Figura 2. 8: Progreso de la carbonatación de los hormigones con el tiempo de exposición

Los resultados indican claramente que CPN presenta menor carbonatación que los cementos con mezclas cuaternarias, donde se observa que QBC1 presenta una profundidad de carbonatación muy similar a la de CPN.

Cuando las adiciones puzolánicas sustituyen al clínker, se reduce la cantidad de portlandita debido a la reacción puzolánica. Los autores indican que la literatura menciona que la profundidad de la carbonatación es mayor cuando la cantidad de portlandita presente es menor. Los autores deducen de los resultados obtenidos que la presencia de ceniza volante (FA) da como resultado una carbonatación más rápida, y de allí las diferencias observadas en la carbonatación de las mezclas cuaternarias estudiadas teniendo mayor carbonatación QBC2 que QBC1.

Este es el caso de los cementos utilizados en este estudio (QBC1 y QBC2) y, a medida que aumenta la cantidad de puzolana, la carbonatación es mayor.

Año: 2010

Título de la Tesis Doctoral: “Influência do teor do calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco”

Autor: J. Wolf

Universidad: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

28

El autor de la tesis doctoral expresa que son pocas las referencias en la literatura relativas a la influencia del porcentaje de filler calcáreo en la carbonatación de cementos compuestos, ya sean blancos o no; lo que se encuentra con cierta frecuencia son consideraciones genéricas especialmente relativas al refinamiento de la estructura porosa con la disminución del diámetro de los poros capilares, lo que evidentemente disminuye la permeabilidad al aire y por consecuencia la carbonatación. De allí que en esa Tesis Doctoral se buscó cuantificar los efectos que el filler calcáreo, conjunta o separadamente molido con el clínker, pueden tener en los productos cementíceos producidos con él.

En la Figura 2.9 se presentan las medias de los resultados obtenidos en la Tesis de Doctorado para cada una de las series de probetas realizadas (S1 y S2).

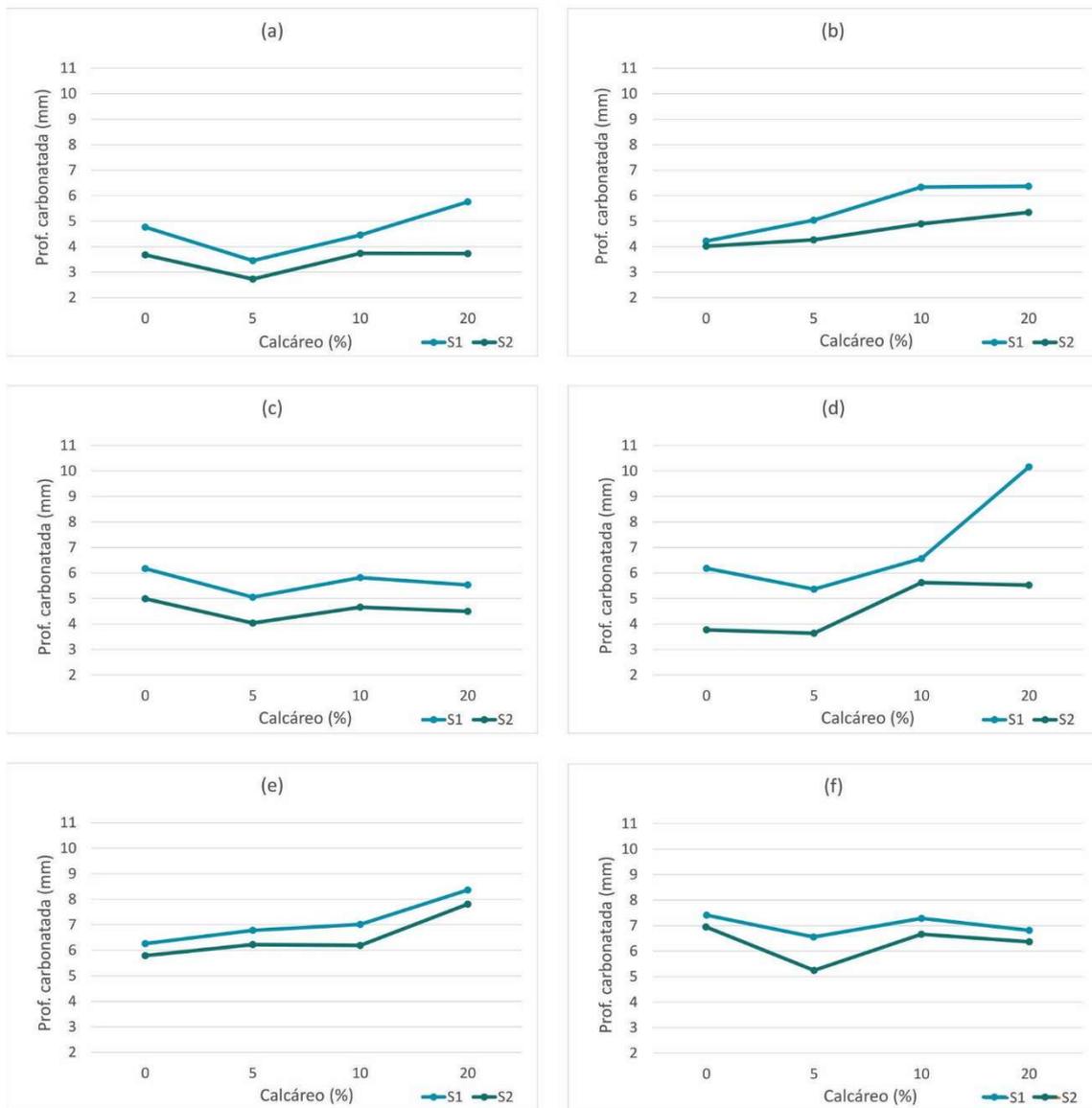


Figura 2. 9: Profundidad carbonatada (mm) vs Porcentaje de calcáreo a los 28 días en morteros hechos con diferentes clínkeres

En la Figura 2.10 se presenta el patrón encontrado de la carbonatación en función del porcentaje de sustitución de clínker por calcáreo. Hay nítidamente una disminución de la carbonatación con la sustitución de hasta 5% de clínker por calcáreo, siendo por ello positivo el efecto de esta sustitución. Esto puede indicar que el efecto de nucleación o cualquier otro efecto, químico o físico, introducido por el filler calcáreo es positivo cuando se utiliza en pequeñas cantidades.

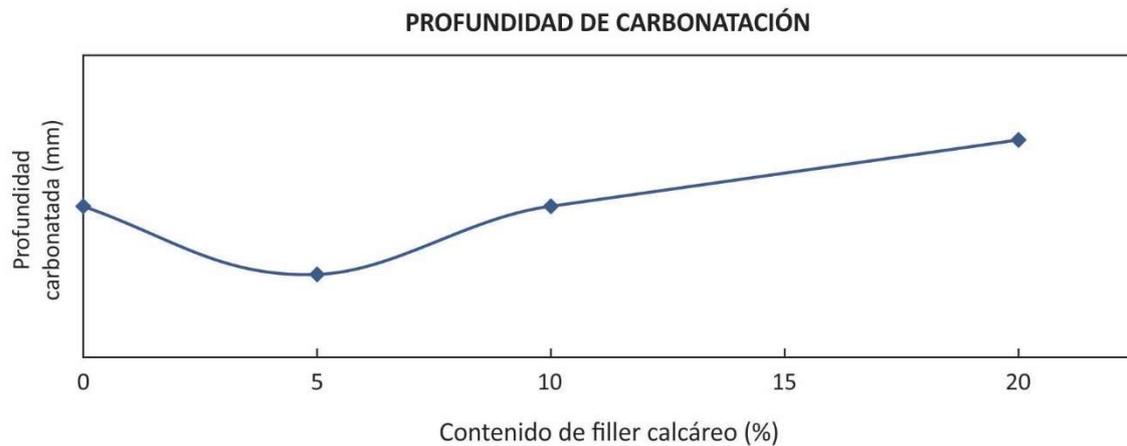


Figura 2. 10: Representación esquemática del comportamiento medio observado de la profundidad carbonatada en función del porcentaje de calcáreo

Año: 2011

Título del Artículo: “Durability of conventional concretes containing black rice husk ash”

Autores: B. Chatveera; P. Lertwattanakul

30

Revista: Journal of Environmental Management 92 (2011); 59-66.

Los autores utilizaron cubos de hormigón de 100 mm de lado para examinar la carbonatación a largo plazo, tomando dos porcentajes de reemplazo de Cemento Portland por CCA (20% y 40%) y tres relaciones agua/cemento distintas (0.6, 0.7 y 0.8 respectivamente). Después de 28 días de curado, las muestras se mantuvieron por 180 días en cámara de carbonatación con contenido de CO₂ del 0,03% a 23° C y con una HR del 70%. Luego se midió la profundidad de carbonatación utilizando el indicador de fenolftaleína que mostró que las profundidades de carbonatación de los hormigones mezclados con CCA son más altas que en el hormigón sin adiciones. El aumento del porcentaje de reemplazo de CCA (del 20% al 40% en peso del aglutinante) tiende a aumentar la profundidad de la carbonatación.

Además, el aumento de la relación agua/cemento tiende a aumentar la porosidad y el volumen de los poros capilares del hormigón, y esto afecta significativamente la profundidad de carbonatación.

Año: 2013

Título del Artículo: “Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study”

Autores: S.K. Antiohos; J.G. Tapali; M. Zervaki; J. Sousa-Coutinho; S. Tsimas; V.G. Papadakis

Revista: Construction and Building Materials 49 (2013); 455-463.

Los autores muestran que los resultados de profundidad de carbonatación para morteros con incorporación de CCA no tratada y para morteros con 10% de sílice activa (SF) no fueron satisfactorios en comparación con los de los morteros de control. Concluyeron que la CCA no tratada no logra, como la mayoría de las adiciones, mejorar la resistencia a la carbonatación ya que para un reemplazo de cemento del 15%, la profundidad de carbonatación casi se duplicó. Al ser puzolánica, la CCA consume Ca(OH)_2 que reduce la alcalinidad y aumenta la carbonatación.

En general, los resultados indican que el uso de CCA sin tratar en sistemas a base de cemento es una alternativa para disminuir su perfil de carbono, siempre que el reemplazo de cemento se mantenga relativamente bajo (por debajo del 15%).

Este también es el caso de la sílice activa (SF). Además, la evolución puzolánica lenta de la CCA amorfa no permite una formación rápida y sustancial de productos de hidratación secundarios que podrían ayudar a cerrar los poros, lo que aumenta la resistencia a la carbonatación.

En principio, se debe esperar un mayor grado de carbonatación en sistemas que tienen o generan más hidróxido de calcio [Ca(OH)_2]. Por lo tanto, cuando las adiciones minerales (es decir, los consumidores de portlandita) se utilizan para reemplazar al Cemento Portland, debería reducirse la carbonatación. Sin embargo, fue demostrado por Papadakis et al. (1991), citado por los autores que la profundidad de carbonatación aumenta, con el aumento del contenido de cada tipo de adiciones minerales utilizadas. También se producen fenómenos conflictivos con la generación de C-S-H secundaria debido a los ingredientes activos de las adiciones (principalmente sílice) que ayudan a la

resistencia y, por otro lado, a la disminución de la tasa de hidratación del cemento que aumenta la permeabilidad, por lo tanto, la entrada de CO₂.

Año: 2013

Título del Artículo: “Carbonation service life modeling of RC structures for concrete with Portland and blended cements”

Autores: P.F. Marques; C. Chastre; A. Nunes

Revista: Cement & Concrete Composites 37 (2013); 171-184

Los autores diseñaron dosificaciones para respetar los requisitos prescritos de NP EN 206-1 para estructuras de hormigón armado con una vida útil (período objetivo) de 50 y 100 años contra la corrosión del acero debido a los ambientes de carbonatación definidos en la Norma.

Considerando la NP EN 206-1 para estructuras de hormigón armado y los resultados obtenidos de la campaña experimental, el análisis de la vida útil lleva a las siguientes conclusiones:

- Para los resultados de los ensayos a los 28 días de edad, solo el CEM I (solo con clínker, similar al Cemento Portland Normal (CPN) de la norma UNIT 20) alcanza y supera en gran medida los períodos objetivo de 50 y 100 años de los requisitos prescritos. Todas las demás composiciones de hormigón en base a cemento con filler calcáreo y cementos compuestos con ceniza volante (FA), tuvieron resultados de vida útil lejos del período objetivo.
- Para los resultados de ensayos en edades de 90, 180 y 365 días, las composiciones combinadas con al menos 50% de clínker pudieron alcanzar lo prescrito, aunque su rendimiento estuvo lejos del obtenido con el CEM I.

Considerando las dosificaciones de hormigón estudiadas y el ambiente estudiado en el trabajo, los autores concluyen que, en presencia de Cemento Portland Compuesto (CPC) con altas cantidades de filler calcáreo o de ceniza volante (FA) con bajo contenido de calcio, los hormigones diseñados no parecen constituir una alternativa entre sí, dado

que los resultados de la vida útil fueron muy diferentes de los períodos objetivo prescritos. En el trabajo se concluye que este es un asunto en el que todavía es necesario realizar estudios para permitir una mejor comprensión de estas diferencias.

Con respecto al efecto del paso del tiempo, para hormigones de 90, 180 y 365 días de edad, aquellos con no menos del 50% de clínker en peso alcanzaron el nivel de confiabilidad requerido para los períodos objetivo de 50 y 100 años. Para el caso de hormigones con Cemento Portland Compuesto (CPC) esto significa una mejor convergencia entre las opciones de diseño de composiciones de hormigón estudiadas en el trabajo.

Año: 2014

Título del Artículo: “Strenght and durability of mortar and concrete containing rice husk ash: A review”

Autores: M.N.N. Khana; M. Jamil; M.R. Karimc; M.F.M. Zain

Revista: World Applied Sciences Journal 32 (5); 752-765.

33

La carbonatación muestra un efecto positivo para hormigones y morteros al aumentar tanto la resistencia a la tracción como a la compresión. Los autores presentan una breve descripción del mecanismo de carbonatación como se presenta a continuación. Al principio, el CO_2 se disuelve en agua y forma ácido carbónico [H_2CO_3]. Una reacción química entre la producción de hidratación del cemento [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] y el ácido carbónico conduce a la formación de carbonato de calcio [CaCO_3] que es responsable de la corrosión del acero. Pero si el cemento se reemplaza por CCA o cualquier otra puzolana, entonces el producto de hidratación del cemento se reduce y aumenta la porosidad del hormigón que se infiltra en el CO_2 . El gel hidratado C-S-H también genera carbonatación al dejar óxido de calcio [CaO] según presentan otros autores (Gastaldini et al., 2007; Rukzon et al., 2009).

Año: 2014

Título del Artículo: “Accelerated Carbonation of Portland Limestone Cement”

Autores: Y. Shao; V. Rostami; Z. He; A.J. Boyd

Revista: Journal of Materials in Civil Engineering 26 (1); 117-124.

En este trabajo se considera la carbonatación acelerada como un proceso en el que el CO₂ se introduce intencionalmente en el hormigón a una edad temprana durante un corto período de tiempo para aumentar rápidamente la resistencia. Se estudió la carbonatación acelerada del Cemento Portland con filler calcáreo (CPF) para evaluar la posibilidad de reemplazar el Cemento Portland Normal (CPN) por CPF en productos de hormigón prefabricado. El comportamiento obtenido con esa carbonatación acelerada se caracterizó por lograr aumentos de resistencia, absorción de CO₂, cambios de pH, que fueron estudiados mediante difracción de rayos X (DRX), termogravimetría (TG), microscopía electrónica de barrido (MEB).

Los autores concluyen que, la alta reactividad de la carbonatación acelerada del CPF posiblemente pueda ser atribuida al tamaño de sus finas partículas y a la existencia de pastas de nucleación de polvo de piedra caliza para la precipitación de carbonato de calcio (CaCO₃); el uso de CPF en la carbonatación acelerada del hormigón puede contribuir significativamente a una reducción de emisiones de carbono.

34

Año: 2015

Título del Artículo: “Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions”

Autores: Q.T. Phung; N. Maes; D. Jacques; E. Bruneel; I. Van Drissche; G. Ye; G. De Schutter.

Revista: Construction and Building Materials 82 (2015); 376-390.

Los autores plantean que, en estructuras subterráneas de hormigón, como las instalaciones de eliminación de desechos radiactivos, el hormigón está sujeto a una presión parcial de CO₂ más alta que en la atmósfera y/o un gradiente de presión más

alto del líquido en el que se disuelve el CO₂. En estas condiciones, el transporte de CO₂, que rige la carbonatación, se produce tanto por difusión como por advección.

Este estudio planteó como objetivo desarrollar un nuevo método experimental para carbonatar materiales cementíceos mediante la aplicación a las muestras de un gradiente de presión elevada de CO₂ puro con una humedad relativa (HR) del 65%. El método propuesto se utilizó para investigar los efectos del filler calcáreo sobre los cambios en la microestructura y la permeabilidad debido a la carbonatación.

Los experimentos se realizaron en dos muestras de pasta de cemento endurecido con diferentes proporciones de sustitución de CP por filler calcáreo). Las muestras se sometieron a una presión de CO₂ elevada de 6 bar en la cara superior. La absorción de CO₂ se midió en los lados ascendente y descendente mediante medidores de flujo másico.

Las muestras carbonatadas se analizaron mediante una serie de métodos que incluyeron microscopía electrónica de barrido (MEB), Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP) y adsorción de N₂ para caracterizar los cambios micro-estructurales; rociado de fenolftaleína, difracción de rayos X (DRX), termogravimetría (TG) y mediciones de permeabilidad al agua para estudiar las alteraciones en las composiciones químicas y las propiedades de transporte.

Los resultados mostraron que la carbonatación de las muestras al 65% de HR fue considerablemente rápida durante las primeras horas, y luego disminuyó significativamente debido al aumento de la HR interna. Sin embargo, alternando la carbonatación con los períodos de secado, como propusieron los autores, la carbonatación se mantuvo alta durante todo el experimento. El estudio evidenció que, además de la portlandita, también el C-S-H fue parcialmente carbonatado. El reemplazo de filler calcáreo promovió la absorción de CO₂ porque la calcita precipita preferentemente en las partículas de piedra caliza que en las fases de portlandita y C-S-H ya que esta última inhibe la carbonatación adicional. La carbonatación del C-S-H se mejoró en muestras sin filler calcáreo, lo que resultó en un aumento del área superficial específica (BET). Por otro lado, en muestras con filler calcáreo, el área de la superficie

específica (BET) disminuyó debido a la porosidad y disminuyó el tamaño de poros. Los resultados mostraron que la carbonatación indujo cambios en la microestructura que resultaron en una disminución significativa en la permeabilidad al agua. Como consecuencia de un área de superficie específica (BET) más grande, una mayor porosidad y reducciones del tamaño de poro, la disminución de la permeabilidad fue más pronunciada en la muestra sin filler calcáreo (Figura 2.11).

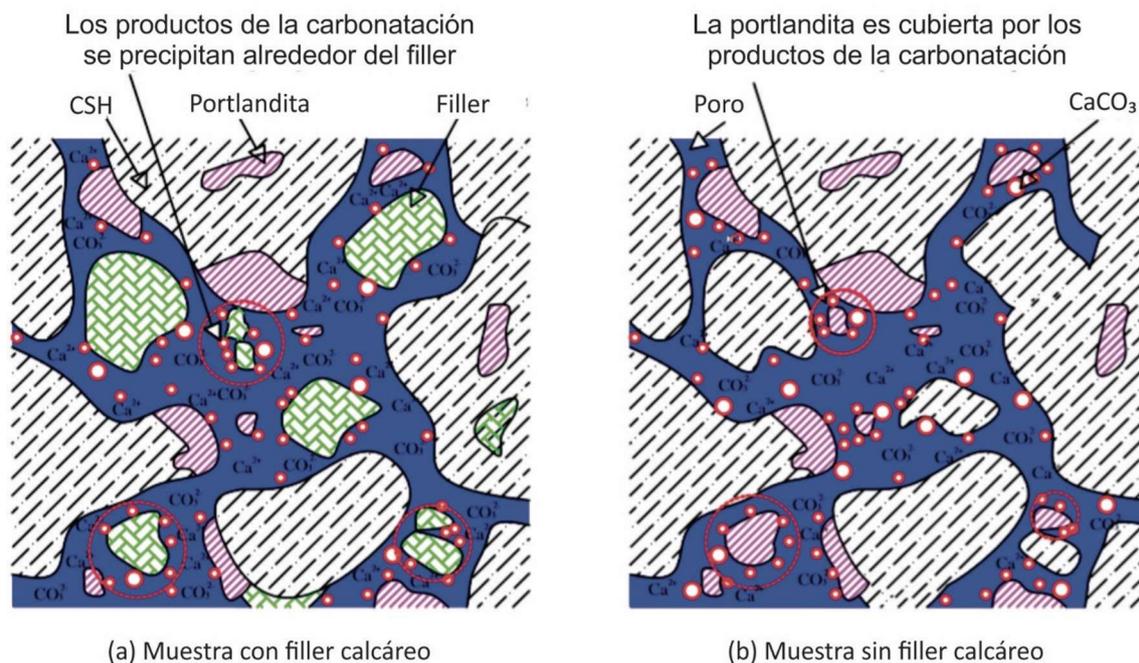


Figura 2. 11: Efecto del filler calcáreo sobre la carbonatación: el filler calcáreo juega como lugar de nucleación para la precipitación del carbonato de calcio

Año: 2016

Título del Artículo: "Influence of Rice Husk Ash on the properties of Concrete: A Review"

Autores: Gai Fei Peng; Juan Yang

Revista: International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD 2016)

Según los autores la profundidad de la carbonatación del hormigón con incorporación de CCA es mayor que la del hormigón común. Además, la incorporación del 15% de CCA no tratada podría casi duplicar la profundidad de carbonatación, porque la CCA consume hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ que reduce la alcalinidad e incrementa la carbonatación.

Año: 2016

Título del Artículo: “Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary of fly ash and limestone filler”

Autores: P. Raposeiro da Silva; J. de Brito

Revista: Materials and Structures (2016); 49: 2749-2766.

En el trabajo se utilizó filler calcáreo y ceniza volante (FA) en hormigones autocompactantes. Se estudiaron mezclas binarias (SCC2) y ternarias (SCC3). Los autores concluyen que las adiciones minerales utilizadas en su estudio afectan la microestructura y durabilidad del hormigón autocompactante. Las propiedades estudiadas están fuertemente condicionadas por el tipo y contenido de las adiciones. Además, el uso de mezclas ternarias demostró ser extremadamente favorable, confirmando el efecto beneficioso esperado de la sinergia entre el filler calcáreo y la ceniza volante (FA).

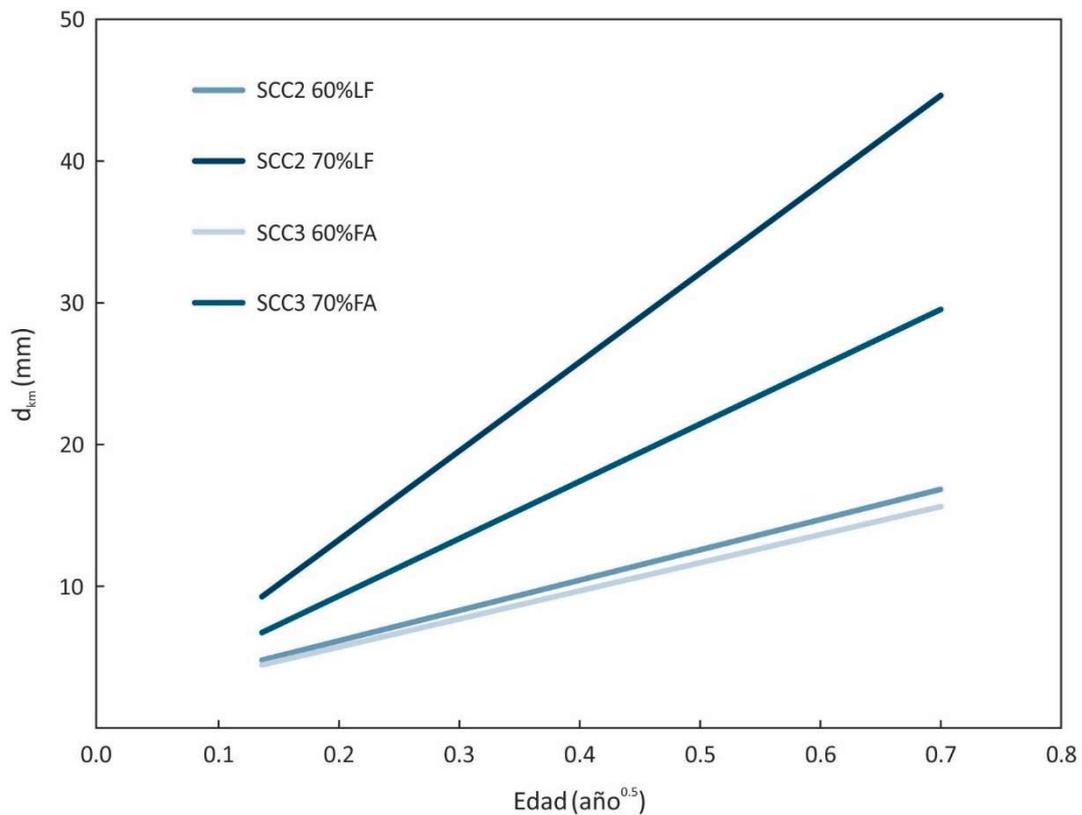


Figura 2. 12: Profundidad de carbonatación en función de $t-0.5$ para todas las mezclas

En la Figura 2.12 puede observarse claramente que las mezclas binarias con 60% de filler calcáreo y ternarias con 60% de ceniza volante (FA), mostraron una resistencia a la carbonatación muy similar; en la Tabla 2.6 ellas alcanzaron una profundidad de carbonatación de aproximadamente 16 mm después 6 meses de exposición. Debido a ello en la presente Tesis de Maestría se trabajará con mezclas binarias para estudiar el efecto de la CCA y/o el filler calcáreo en la carbonatación y luego se estudiarán mezclas ternarias.

Mix	$d_{km.7 \text{ days}}$ (mm)	S (mm)	$d_{km.28 \text{ days}}$ (mm)	S (mm)	$d_{km.91 \text{ days}}$ (mm)	S (mm)	$d_{km.182 \text{ days}}$ (mm)	S (mm)	K_c (mm/ year ^{0.5})	R^2
SCC1.100C	<1	–	<1	–	<1	–	<1	–	1.00	–
SCC2.30LF	<1	–	<1	–	<1	–	<1	–	1.00	–
SCC2.60LF	5	0.58	9	0.50	13	0.58	16	0.96	22.57	0.97
SCC2.70LF	10	0.50	19	0.50	28	1.00	48	0.50	64.23	0.97
SCC3.30FA	<1	–	<1	–	<1	–	<1	–	1.00	–
SCC3.60FA	5	0.58	10	0.50	11	1.15	16	1.26	20.78	0.91
SCC3.70FA	9	0.58	14	0.82	18	0.50	32	2.63	40.89	0.94
SCC4.10FA20LF	<1	–	<1	–	<1	–	<1	–	1.00	–
SCC4.20FA10LF	<1	–	<1	–	<1	–	<1	–	1.00	–
SCC5.20FA40LF	6	0.50	13	0.96	23	1.50	26	2.71	37.96	0.96
SCC5.40FA20LF	5	0.50	12	1.15	21	2.22	24	0.82	35.53	0.97

Tabla 2. 6: Profundidad de carbonatación y su correspondiente coeficiente para todas las mezclas

Año: 2016

Título del Artículo: “Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review”

Autores: M.M. Hossain; M.R. Karim; M. Hasan; M.K. Hossain, M.F.M. Zain

Revista: Construction and Building Materials 116 (2016) 128-140

La profundidad de carbonatación de morteros y hormigones depende principalmente de las propiedades físicas, químicas, porosidad y permeabilidad del aglomerante. Collepardi et al. (2004) mostraron la influencia de las adiciones minerales (ceniza volante (FA), escorias y piedra caliza molida) incorporadas al Cemento Portland Normal (CPN) en la tasa de penetración de CO₂ en hormigones fabricados con una relación dada agua/cemento. Los autores concluyeron que cuando la comparación de la profundidad de carbonatación se realiza en hormigones con iguales resistencias, no hay una

diferencia significativa entre hormigones confeccionados con Cemento Portland Normal (CPN) y aquellos con incorporación de puzolanas con niveles de reemplazo de hasta el 50% (Tabla 2.7).

Composición de material cementicio (%)				Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación a/c	Resistencia compresión (Mpa)	Profundidad de carbonatación (mm)					
CP	Caliza	Ceniza volante	Escoria				30 días	45 días	60 días	90 días	180 días	360 días
100	-	-	-	300	0.6	43.0	0.5	2.0	2.5	3.5	4.0	4.8
85	-	-	15	300	0.6	40.3	0.5	2.5	3.0	3.5	4.8	5.9
50	-	-	50	350	0.5	42.2	0.5	1.5	2.0	3.0	4.0	5.5
85	15	-	-	350	0.5	45.0	0.0	2.0	2.5	3.0	3.5	4.7
75	25	-	-	350	0.5	40.3	0.5	2.0	3.0	4.5	6.0	6.9
75	-	25	-	350	0.5	44.0	0.0	1.0	2.0	3.5	5.0	5.7
<i>Promedio</i>						<i>42.5</i>	<i>0.3</i>	<i>1.8</i>	<i>2.5</i>	<i>3.5</i>	<i>4.5</i>	<i>5.5</i>

Tabla 2. 7: Profundidad de carbonatación del hormigón con y sin puzolanas con una resistencia a la compresión a los 28 días en el rango de 40-45 MPa

Los autores mencionan el trabajo de Yu et al. (1999) que se ha mencionado en este capítulo, indicando que para CCA se obtienen resultados similares a los encontrados por Horsakulthai y Paopongpaiboon (2013) con bagazo, CCA y madera.

Año: 2017

Título del Artículo: “Carbonation resistance of concrete: Limestone addition effect”

Autores: A.A. Elgalhud; R.K. Dhir; G.S. Ghataora

Revista: Magazine of Concrete Research, 69 (2); 84-106; 2017.

Se presenta un análisis sistemático y una evaluación de los resultados experimentales sobre la carbonatación y la resistencia a la corrosión inducida por la carbonatación del hormigón hecho con Cemento Portland y filler calcáreo (CPF). Los resultados fueron extraídos de 143 estudios publicados en todo el mundo desde 1986, por 274 investigadores de 131 instituciones y 34 países, y se presenta una matriz con 19.000 datos (Figura 2.13).

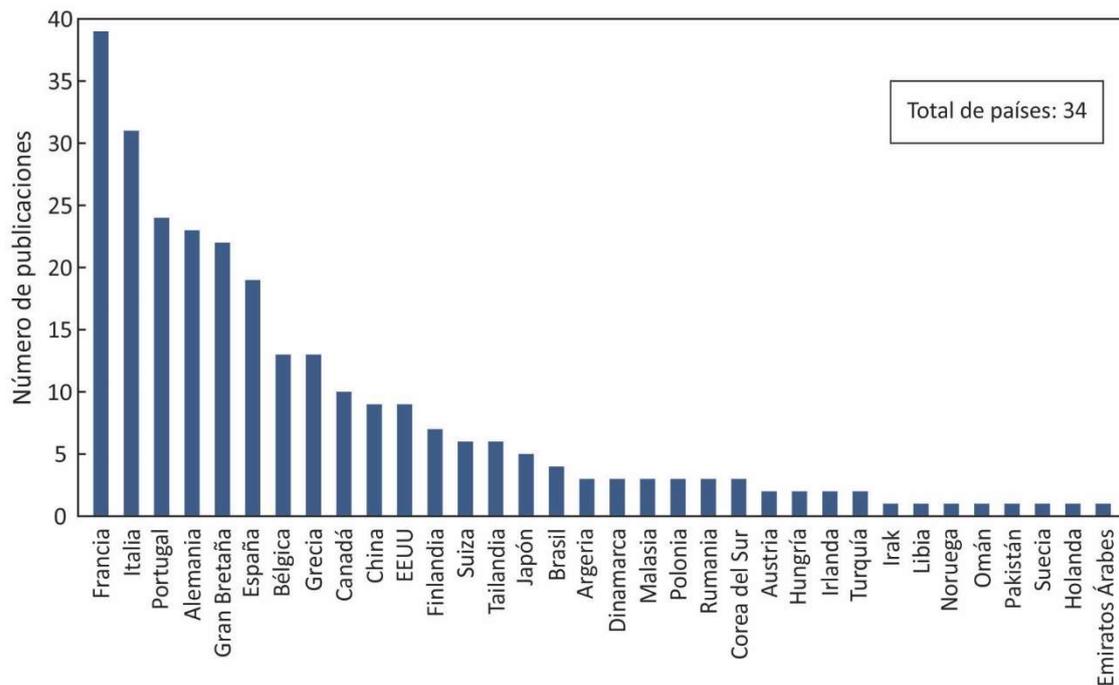


Figura 2. 13: Distribución por país de los autores de las publicaciones recopiladas

Los autores muestran que la carbonatación del hormigón aumenta con el aumento del contenido de filler calcáreo, dentro del rango permitido por la norma BS EN 197-1: 2011. Sin embargo, este efecto es menos marcado para el hormigón diseñado en una base de resistencia igual al hormigón de Cemento Portland Normal (CPN) con igual relación agua/cemento (a/c).

Se estudiaron distintos factores influyentes: curado, finura de filler calcáreo, contenido total de cemento. Se realizó una comparación de la profundidad de carbonatación del hormigón hecho con Cemento Portland y filler calcáreo (CPF) y de Cemento Portland con ceniza volante y escoria granulada de alto horno (FA y GGBS). Los autores proponen procedimientos para reducir la carbonatación del hormigón con Cemento Portland y filler calcáreo (CPF). La respuesta a la carbonatación acelerada, a una concentración de CO₂ del 3–5%, del hormigón CPF es similar a la exposición natural en interiores. Se determinó un factor de conversión de 1 semana de carbonatación acelerada igual a 0,75 años de exposición natural en interiores.

Los autores concluyeron que:

- En general, las combinaciones de filler calcáreo con Cemento Portland producen mayor carbonatación. Este aumento depende de la composición del hormigón en términos de su relación agua/cemento y resistencia, edad y estructura de poros.

- Mediciones mostraron que la profundidad de carbonatación de hormigones con 30% de filler calcáreo aumenta en el orden del 50%.

- Para el hormigón con Cemento Portland y filler calcáreo (CPF) diseñado en términos de igual resistencia o relación agua/cemento al hormigón común, la carbonatación del hormigón con filler calcáreo (CPF) es mayor que la obtenida en base a la misma resistencia, tanto para carbonatación natural como acelerada. Esta diferencia puede reducirse con el uso de filler calcáreo más fino y/o con curado húmedo extendido de mezclas de hormigón diseñadas con la misma relación a/c. Las mezclas de cemento y filler calcáreo (CPF) diseñadas con igual resistencia y expuestas a un curado húmedo prolongado pueden lograr una resistencia a la carbonatación cercana a la del hormigón común.

- Se descubrió que una semana de carbonatación acelerada de hormigón con filler calcáreo (CPF), con una CO_2 de 3–5%, era aproximadamente equivalente a 0,75 años de exposición natural en interiores.

- Se encontró que en el hormigón elaborado con Cemento Portland con filler calcáreo (CPF), cuando la carbonatación llega al acero, era mayor que en la del hormigón con Cemento Portland Normal (CPN).

- Las mediciones de carbonatación in situ de 1 a 5 años de estructuras de hormigón hechas con Cemento Portland Normal (CPN) y Cemento Portland con filler calcáreo (CPF) mostraron que, aunque la carbonatación varía con las condiciones de exposición, es probable que el hormigón que contiene filler calcáreo carbonate más rápido que el hormigón común.

- Para disminuir la influencia de la carbonatación del hormigón con filler calcáreo (CPF) en el hormigón estructural, se debe considerar restringir la adición de filler calcáreo y aumentar la resistencia objetivo y/o el espesor de recubrimiento. No obstante, estas

medidas deben evaluarse junto con los otros requisitos de diseño de durabilidad y sostenibilidad.

- Comparando los valores de carbonatación del hormigón con filler calcáreo (CPF) con hormigón hecho con cemento que contiene ceniza volante (Lye et al., 2015) y escoria granulada de alto horno (Lye et al., 2016), se concluye que presentan similar carbonatación la cual es más alta que en el hormigón común.

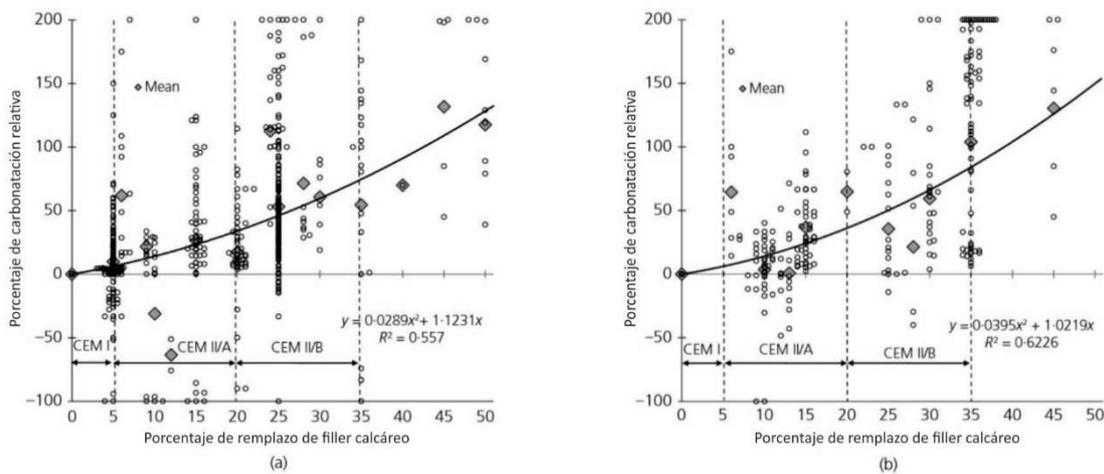


Figura 2. 14: Influencia del filler calcáreo en la resistencia a la carbonatación de hormigones con igual relación a/c para (a) exposición natural y (b) carbonatación acelerada

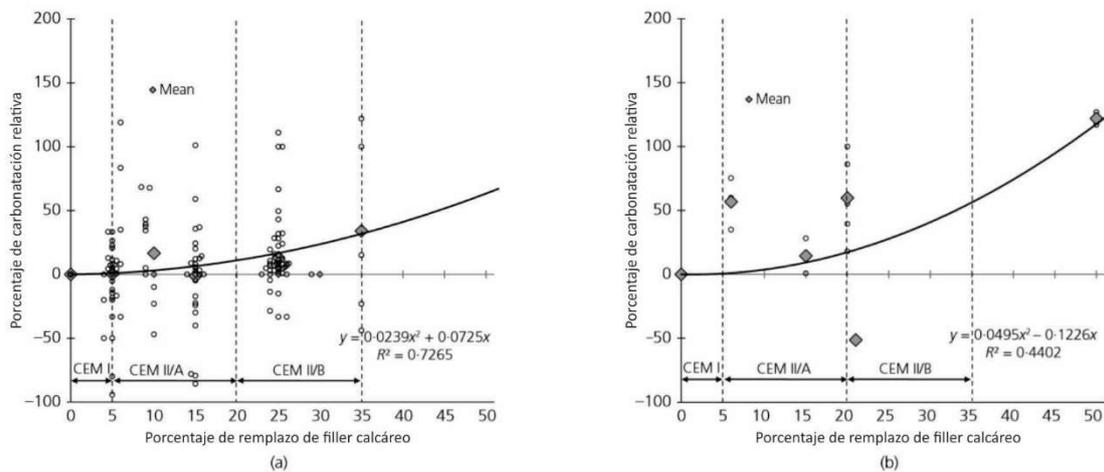


Figura 2. 15: Influencia del filler calcáreo en la resistencia a la carbonatación de hormigones con la misma resistencia a los 28 días para (a) exposición natural y (b) carbonatación acelerada

Año: 2017

Título del Artículo: “Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade”

Autores: G.C. Isaia; R.L. Zerbino; A.L.G. Gastaldini; G. Rodríguez de Sensale

Revista: Ambiente Construido, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 233-252, abr./jun. 2017

En este trabajo se utilizó ceniza de cáscara de arroz natural (CCAN) y ceniza de cáscara de arroz molida (CCAM).

En la Tabla 2.8 los autores muestran los coeficientes de carbonatación acelerada, después de 91 días de edad, y después de 900 días (2,5 años) en ambiente de laboratorio, con sus respectivos índices en relación con las muestras de referencia.

	f_{c28} Mpa	REF	CCAM 15	CCAN 15
kc acelerada	25	3.24- <u>100</u>	3.89-120	3.68-114
mm.sem ^{-0.5}	30	2.63- <u>100</u>	3.44-131	2.91-111
91 días	40	1.80- <u>100</u>	2.27-125	1.95-105
kc natural	25	4.12- <u>100</u>	4.97-121	5.22-127
mm.año ^{-0.5}	30	3.62- <u>100</u>	4.59-127	4.36-120
900 días	40	2.62- <u>100</u>	3.37-129	3.22-123

Tabla 2. 8: Coeficientes de carbonatación acelerada y natural (REF: I=100)

Las probetas de REF sin CCA tenían los coeficientes más bajos ya que presentaban los contenidos de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ más altos, que fueron parcialmente consumidos por la sílice amorfa de la CCA. Observaron que las muestras con 15% de CCAM presentaban coeficientes más bajos que las muestran con 15% de CCAN a los 91 días de edad, a los 900 días los resultados con ambas cenizas son similares.

Se muestra que la CCAN es más sensible a las pruebas aceleradas que a las pruebas naturales. De la Figura 2.16 se desprende que la CCA, sea molida o no, aumenta la carbonatación natural y acelerada.

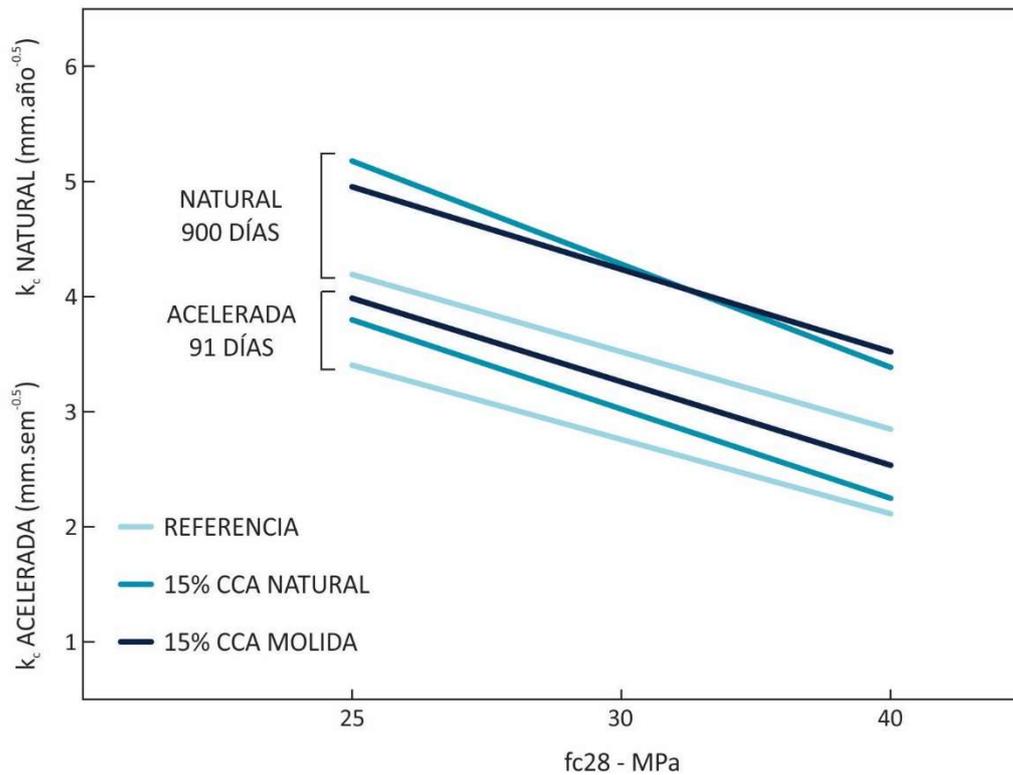


Figura 2. 16: Variación del coeficiente de carbonatación acelerada y natural con una resistencia a la compresión f_{c28}

Año: 2017

Título del Artículo: "Modeling of Hydration, Compressive Strength, and Carbonation of Portland-Limestone Cement (PLC) Concrete".

Autor: X-Y Wang

Revista: Materials (2017), 10, 115

La piedra caliza se usa ampliamente en la industria de la construcción para producir hormigón con Cemento Portland fillerizado (CPF). Las evaluaciones sistemáticas de la cinética de hidratación, el desarrollo de la resistencia a la compresión y la resistencia a la carbonatación son cruciales para el uso racional del filler calcáreo. Este estudio presenta un modelo basado en la hidratación para evaluar la influencia del filler calcáreo en la resistencia y en la carbonatación del hormigón.

El Cemento Portland fillerizado (CPF) se obtiene al intercalar el clínker de Cemento Portland con diversos contenidos de piedra caliza. La piedra caliza se muele más fácilmente que el clínker y se concentra en las partículas finas. Se pueden lograr muchos beneficios mediante el uso del hormigón con Cemento Portland fillerizado (CPF). Éste muestra mejor trabajabilidad y menos exudación que el hormigón común. Cuando la relación de reemplazo de filler es inferior al 5%, el rendimiento del hormigón no se ve afectado. Además, mediante el uso de Cemento Portland fillerizado (CPF), se pueden obtener ventajas ecológicas, como la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y nitratos (NO_3) de la fabricación de cemento.

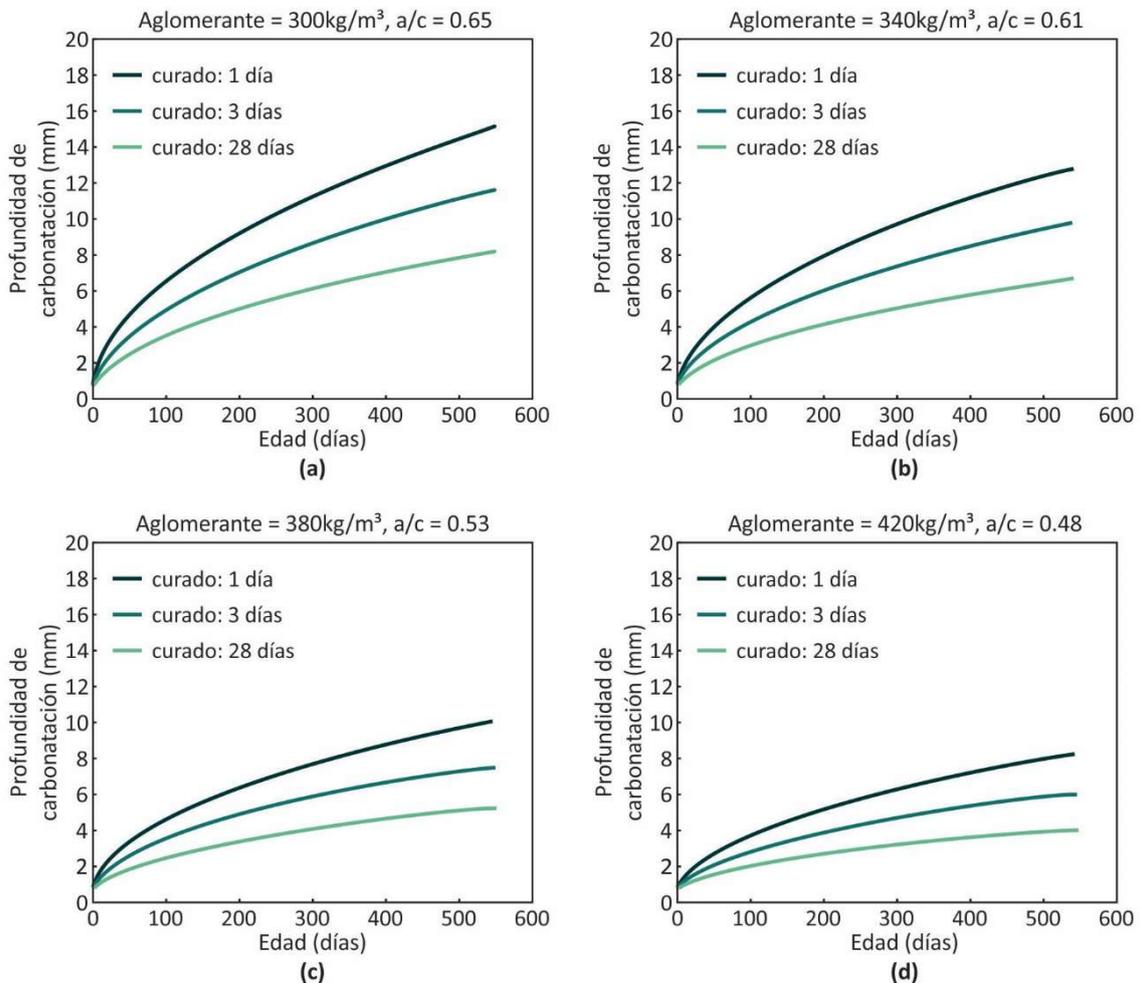


Figura 2. 17: Profundidad de carbonatación del hormigón con CPF. Relación agua/aglomerante (a) 0.65; (b) 0.61; (c) 0.53; y (d) 0.48

De los resultados obtenidos en el trabajo (Figuras 2.17 y 2.18), el autor concluye que con el aumento de las relaciones agua/aglomerante y el contenido de filler calcáreo o las reducciones en el período de curado, aumenta la profundidad de carbonatación del hormigón.

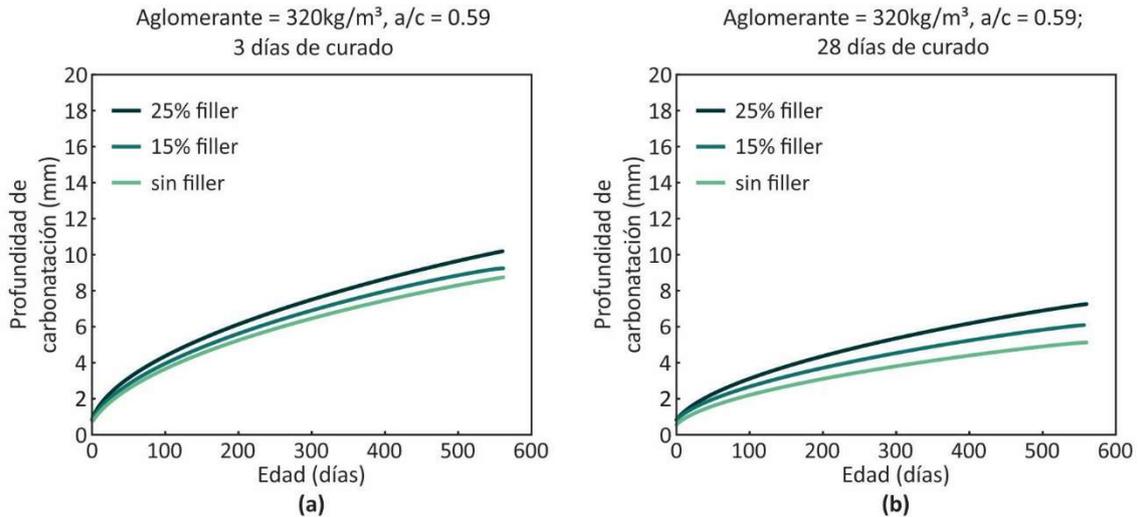


Figura 2. 18: Efectos de los reemplazos de filler calcáreo en la carbonatación: (a) 3 días de curado; (b) 28 días de curado

Año: 2018

Título del Artículo: “Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review”

Autor: B.S. Thomas

Revista: Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 3913–3923

Este trabajo presenta una visión general de algunos de los resultados publicados sobre la utilización de CCA como material cementíceo suplementario y las propiedades de dicho hormigón en estado fresco y endurecido.

El autor plantea que los estudios indican que existe un futuro prometedor para el uso de CCA en el hormigón común, de alta resistencia y autocompactante, ya que muestra

alta resistencia, baja contracción y permeabilidad, alta resistencia a la carbonatación, a los cloruros, sulfatos y ambientes ácidos. En relación a la carbonatación el autor presenta y discute los trabajos de Gastaldini et al. (2007) y de Chatveera y Lertwattanak (2014) ya presentados en este capítulo, concluyendo que el aumento de la carbonatación se atribuye al aumento de la porosidad y a la menor concentración de cemento.

Año: 2019

Título del Artículo: "Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability"

Autores: Sabbie A. Miller; Patrick R. Cunningham; John T. Harvey

Revista: Resources, Conservation & Recycling 146 (2019), 416-430

Según los autores algunos resultados han indicado que la CCA puede contribuir a reducir la carbonatación; otros han sugerido que, en comparación con una mezcla que contiene Cemento Portland como único aglomerante, el uso de CCA aumenta la carbonatación. El uso de CCA en hormigón también puede reducir la deformación por fluencia. Si bien estos parámetros de durabilidad no se analizan tan a fondo en la literatura, los autores del trabajo indican que los informes actuales sugieren que la CCA tiene una gran capacidad para mejorar muchas propiedades de durabilidad del hormigón.

Para el autor de la presente Tesis de Maestría el que la carbonatación no esté estudiada tan a fondo fue un incentivo para la realización de la misma.

CAPÍTULO 3: PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología para el estudio fue teórica y experimental. En primera instancia se efectuó una revisión bibliográfica crítica sobre los temas de la carbonatación y los morteros y cementos con adición de CCA y de filler calcáreo, teniendo en cuenta los principales factores que influyen en la misma tales como temperatura, humedad relativa, relación agua/cemento, porosidad del hormigón, velocidad de carbonatación.

Seguidamente, tomando como base el Proyecto ANII FSE 2011-1-6476, se diseñó y realizó una investigación experimental mediante la elaboración de probetas de mortero de cemento con distintas proporciones de CCA (GALOFER y ARROZUR) y filler calcáreo, utilizando los equipos y materiales con los que cuentan los laboratorios del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería (UdelaR). Asimismo, se realizó un estudio de la microestructura de algunas de las probetas de mortero realizadas en la campaña experimental; ello fue realizado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la Facultad de Ciencias (UdelaR); luego se trató de relacionar características del estudio microestructural con los resultados de profundidad de carbonatación obtenidos experimentalmente.

En este capítulo se presentan las distintas etapas desarrolladas en la investigación experimental, detallando la preparación, los materiales empleados y los procedimientos de ensayo.

3.1. – METODOLOGÍA EMPLEADA

Para el presente estudio se elaboraron 96 probetas de mortero de cemento todas con igual relación agua/cemento (0.5), distintas proporciones de Cemento Portland y de CCA (GALOFER y ARROZUR) y filler calcáreo. Se utilizó de manera alternada filler calcáreo como se presenta en la Tabla 3.1, tomando como base el estudio del Proyecto ANII FSE 2011-1-6476 (evaluación de las emisiones de CO₂ del Cemento Portland compuesto con cenizas de cáscara de arroz), cuyos resultados dieron lugar a un trabajo que fue publicado en una revista internacional indexada (Rodríguez de Sensale y Rodríguez Viacava, 2018). En dicho trabajo se le agregó a las dos CCA estudiadas 5% de filler

calcáreo para mejorar la trabajabilidad que la CCA disminuye notoriamente cuanto más porcentaje se emplea, de allí que en esta Tesis se creyó conveniente estudiar por un lado los efectos de cada una de las adiciones empleadas (CCA, de ARROZUR y de GALOFER, filler calcáreo) en diferentes porcentajes (0 a 30%) y luego las dosificaciones estudiadas en el Proyecto mencionado (con 0 a 30% de CCA y 5% de filler calcáreo).

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom	
		Fina	Gruesa								
1	Ref.	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50	SIN CCA
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50	
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50	
4	CCA 0 / F10	405.00	945.00	225.00	405.00	0.00	0%	45.00	10%	0.50	
5	CCA 0 / F15	405.00	945.00	225.00	382.50	0.00	0%	67.50	15%	0.50	
6	CCA 0 / F20	405.00	945.00	225.00	360.00	0.00	0%	90.00	20%	0.50	
7	CCA 0 / F25	405.00	945.00	225.00	337.50	0.00	0%	112.50	25%	0.50	
8	CCA 0 / F30	405.00	945.00	225.00	315.00	0.00	0%	135.00	30%	0.50	
9	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50	CCA ARROZUR
10	CCA 10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50	
11	CCA 15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50	
12	CCA 20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50	
13	CCA 25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50	
14	CCA 30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50	
15	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50	
16	CCA 10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50	
17	CCA 15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50	
18	CCA 20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50	
19	CCA 25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50	
20	CCA 30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50	
21	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50	CCA GALOFER
22	CCA 10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50	
23	CCA 15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50	
24	CCA 20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50	
25	CCA 25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50	
26	CCA 30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50	
27	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50	
28	CCA 10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50	
29	CCA 15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50	
30	CCA 20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50	
31	CCA 25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50	
32	CCA 30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50	

Tabla 3. 1: Dosificación de los materiales empleados

Tal como se observó en el trabajo de Wolf (2010) y el de Wang (2017), ambos presentados en el Capítulo 2 de la presente Tesis, se constata una disminución de la carbonatación con la sustitución de hasta 5% de clínker por calcáreo, siendo por ello positivo el efecto de esta sustitución; por esta razón se utilizó ese porcentaje de sustitución en las probetas con CCA.

Una vez elaboradas, las mismas fueron curadas 7 días como se indica en 3.4. Posteriormente se dejaron por 28 días en ambiente de laboratorio (ambiente controlado con $t=20^{\circ}\text{C}$ y H.R. = 50%). Por último, se sometieron las probetas a cámara de carbonatación como se indica en 3.5

Transcurrido el plazo establecido se retiraron de la cámara de carbonatación y se rompieron con 63 días de edad. Posteriormente se verificó la profundidad de carbonatación en cada una de las probetas registrando los datos correspondientes y se estudió la microestructura de muestras seleccionadas mediante MEB.

3.2. – MATERIALES EMPLEADOS

Todos los materiales empleados en el estudio fueron locales:

- Cemento Portland Normal (CPN) correspondiente a la clase CP40, cuyas características figuran en la Tabla 3.2.

- Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA) que fueron provistas por las empresas productoras del residuo: se utilizaron dos tipos de CCA de diferente origen provenientes de distintos procesos industriales. Uno de ellos es un residuo del uso de la cáscara de arroz como combustible para generar vapor en el proceso de parbolizado del arroz (CCA ARROZUR). El otro, es un residuo del uso de la cáscara de arroz como biomasa para la generación de energía eléctrica (CCA GALOFER). Para prepararlos para su uso en el cemento fue necesario someterlos a operaciones de secado simple hasta alcanzar un peso constante (ya que ambas CCA tenían una humedad superior al 3%), tamizado con tamiz de 1.18mm (para eliminar impurezas como cáscaras de arroz no quemadas, agregados, etc.) y molienda (para adquirir puzolanicidad). Luego, se estudió el tiempo óptimo de molienda para el uso de CCA en el cemento. Ambas muestras de CCA fueron sometidas a molienda

en seco en diferentes momentos. La distribución del tamaño de partícula de las muestras obtenidas se estudió con equipos de luz láser Coulter LS 230. A través del proceso de molienda, el tamaño de partícula disminuyó en los tiempos de molienda de 5 a 30 minutos para ambas CCA con el tipo de molino utilizado; cuando la duración de la molienda fue superior a 30 minutos, el tamaño medio de partícula aumentó. Esto se debe a la aglomeración de partículas asociada con un tiempo de molienda excesivo.

Características físicas	CPN	CCA Arrozur	CCA Galofer	Filler Calcáreo
Densidad absoluta (g/cm ³)	3.14	2.08	2.16	2.74
Tamaño medio de partículas (µm)	20.76	7.53	4.12	6.35
Finura Blaine (m ² /kg)	325.3	1008.4	892.2	412.6
Absorción de Nitrógeno (m ² /kg)	-	41630	36800	-
Análisis químico (%)				
Óxido de silicio (SiO ₂)	20	83	83	12 ± 1
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4.34	2	<2	<2
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	3.62	0.096	0.24	1.2
Óxido de calcio Total (CaO)	61.5	0.3	0.29	40 ± 4
Óxido de magnesio (MgO)	2.81	0.1	0.13	2.1
Óxido de manganeso (MnO)	-	0.12	0.25	0.975 ± 0.09
Óxido de sodio (Na ₂ O)	0.29	-	-	-
Óxido de potasio (K ₂ O)	1.08	0.7	2	<2
Óxido de azufre (SO ₃)	1.79	<0.02	0.0208	0.0396
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	-	0.62	0.78	<0.2
Óxido de calcio libre (CaO)	1.1	-	-	-
Sulfuros (S ²)	0.01	0.66	0.43	-
Cloruros (Cl)	0.01	0.03	0.12	<0.2
Pérdida por calcinación	0.01	13.15	11.01	35
Residuo insoluble	2.97	36	49.9	16.8
Alcalinos totales (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	0.98	0.461	1.32	<1.32

Tabla 3. 2: Características físicas y químicas de los materiales empleados

Los valores de resistencia obtenidos con cementos de 28 días de edad sólo fueron superiores a 0.75 con un tiempo de molienda de 30 minutos, por lo que allí se tenía CCA puzolánica (UNIT 1047:1999). El tamaño medio de partícula y los índices de actividad de mayor resistencia con cemento obtenido con tiempos de molienda de 30 minutos fueron 7,53 μm y 0,90 para CCA ARROZUR, y 4,12 μm y 0,81 para CCA GALOFER, respectivamente. Las características físicas y químicas de ambos CCA se muestran en la Tabla 3.2. Para la determinación de los componentes químicos se utilizaron métodos tradicionales de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (ED-XRF). Ambas CCA estudiadas tenían el mismo contenido de SiO_2 . Se utilizó un método analítico rápido para evaluar el contenido de sílice amorfa en las CCA; el porcentaje de sílice reactiva contenida en CCA ARROZUR fue del 39,39% y en CCA GALOFER fue del 34,83% (Rodríguez de Sensale y Rodríguez Viacava, 2018). Para detectar las fases cristalinas presentes, se estudiaron las CCA por difracción de rayos X (DRX), utilizando el método de polvo con un difractómetro RIGAKU-UltimaIV. El diagrama de difracción de rayos X de cada muestra se presenta en la Figura 3.1. Se observaron picos cristalinos en ambas CCA, que se identificaron como cristobalita SiO_2 en CCA ARROZUR mientras que en CCA GALOFER son cuarzo SiO_2 y cristobalita SiO_2 . Se ha demostrado experimentalmente que la molienda por desgaste del cuarzo cristalino puede activar la sílice al romper los enlaces químicos en la superficie (Metha, 1978).

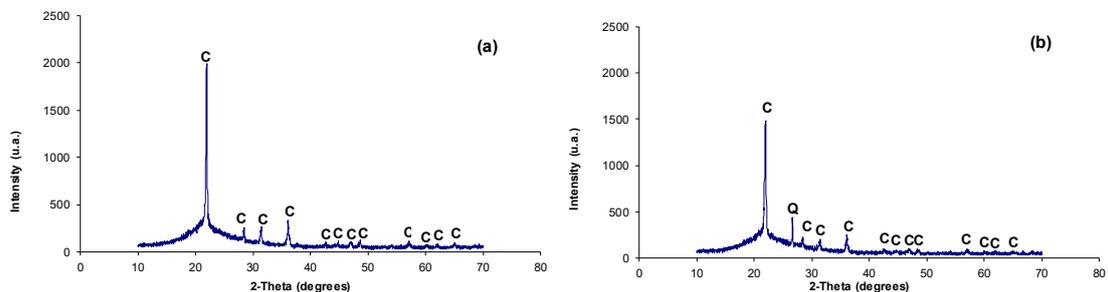


Figura 3. 1: Difracción de rayos X de cenizas de cáscara de arroz: (a) CCA ARROZUR; (b) CCA GALOFER

La Figura 3.2 muestra la microscopía electrónica de barrido (MEB) de ambas cenizas y el filler calcáreo empleados. Las imágenes (a) y (b) muestran claramente que hay mayor cantidad de impurezas en la superficie de CCA GALOFER que en CCA ARROZUR. Según Soares et al. (2015), cuando estas impurezas están presentes en la superficie de la sílice, disminuyen su actividad puzolánica, ya que reduce el área de superficie activa para reaccionar; por esta razón, CCA ARROZUR tiene una mayor actividad puzolánica que CCA GALOFER.

- Filler calcáreo cuyas características físicas y químicas figuran en la Tabla 3.2. Cabe observar que el filler calcáreo empleado fue provisto por una de las empresas cementeras de nuestro país y cumple con los requisitos de la normativa.

- Arena normalizada ISO para la realización de probetas de mortero. La arena utilizada fue la CEN EN196-1 (proporcionada por la SNL – Societe Nouvelle du Litoral – de Francia), suministrada en bolsas en la cantidad requerida (1350g) para la realización de probetas para ensayo de resistencia de cementos. Es una arena natural, silíceo, de granos redondeados, y cuyo contenido en sílice es al menos 98% (UNIT-ISO 679:2009)

- Agua destilada.

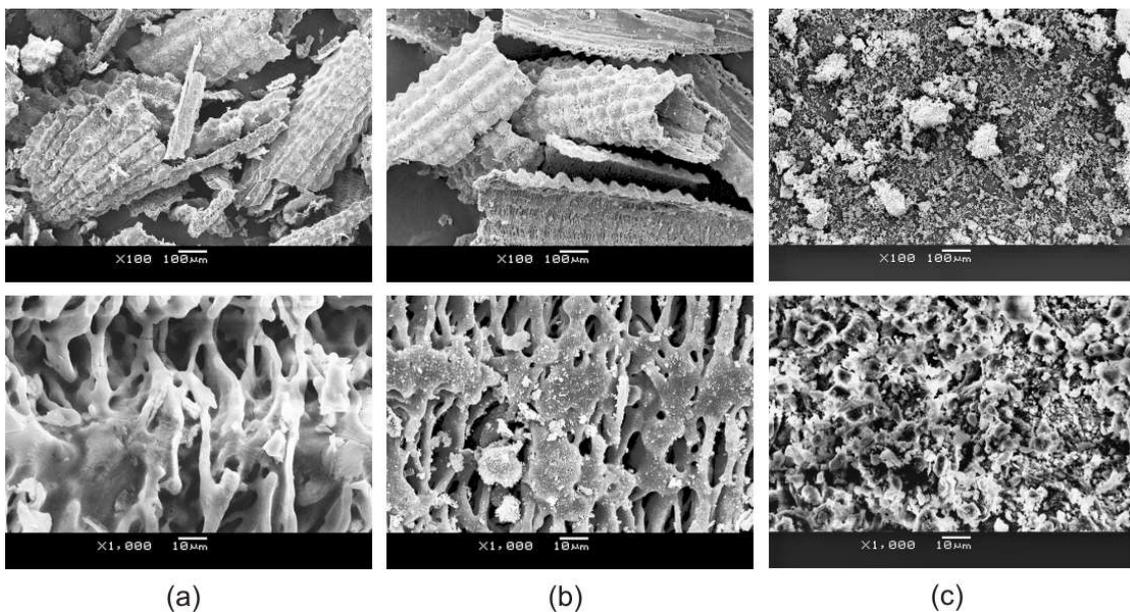


Figura 3. 2: MEB de filler calcáreo y cenizas de cáscara de arroz: (a) CCA ARROZUR; (b) CCA GALOFER; y (c) filler calcáreo

3.3. – ELABORACIÓN Y PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para la elaboración de las probetas se utilizaron moldes para obtener barras prismáticas de base cuadrada de 40mm de lado por 160mm de altura.

Se empleó el procedimiento normalizado para ensayos de cementos (Norma UNIT-ISO 679:2009).

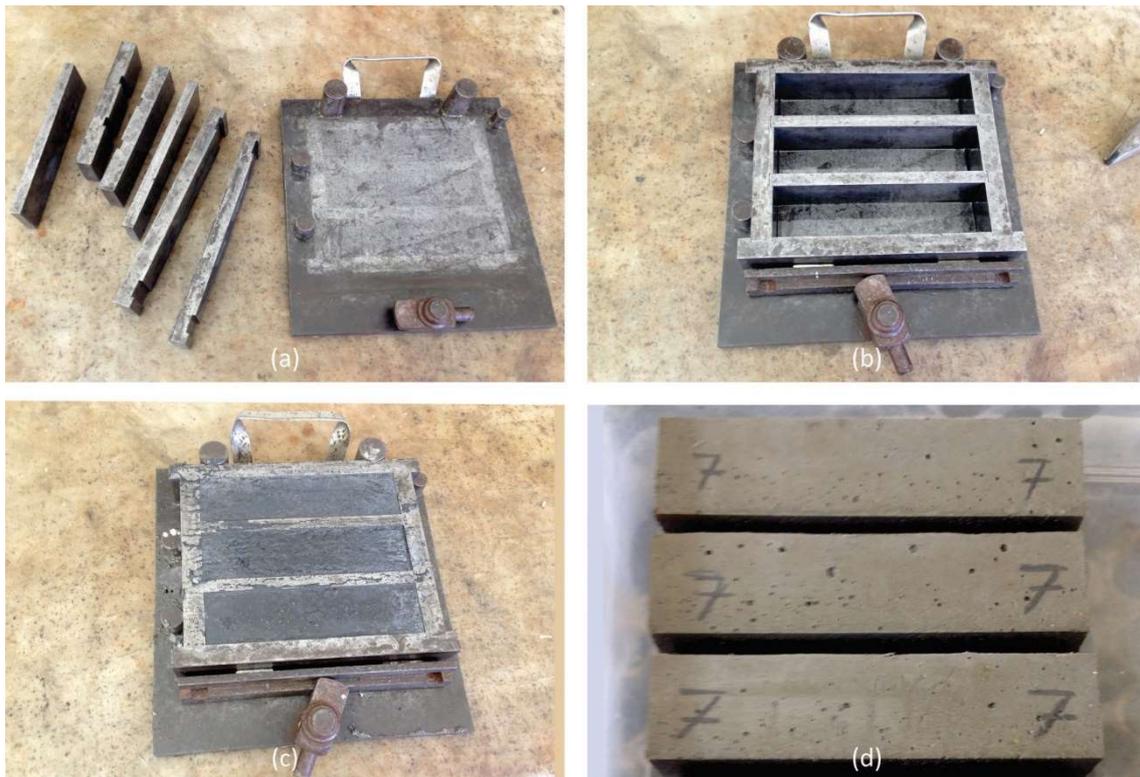


Figura 3. 3: (a y b) Moldes utilizados para la elaboración de las probetas, (c) probetas en los moldes y (d) probetas desmoldadas

Amasado de mortero:

Se pesó con una balanza el cemento. El agua se añadió en volumen, con exactitud de ± 1 ml. Se mezcló mecánicamente cada amasada de mortero, utilizando una mezcladora (Figura 3.4).



Figura 3. 4: (a) Amasadora y (b) compactadora empleadas

El procedimiento de amasado fue el siguiente:

- 1- Se colocaron el agua y el cemento en el recipiente de la mezcladora.
- 2- Inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el cemento, se prendió la mezcladora a velocidad lenta, iniciándose los tiempos de amasado. Luego de 30 segundos de amasado, se añadió regularmente la arena durante los 30 segundos siguientes. Se puso la mezcladora a velocidad rápida y se continuó el amasado por otros 30 segundos.
- 3- Se paró la mezcladora durante 90 segundos. En los primeros 30 segundos se retiró, con espátula de goma, todo el mortero adherido a las paredes laterales y al fondo del recipiente y se colocó en el centro de la mezcladora.
- 4- Se continuó el amasado durante 60 segundos a velocidad rápida.

Previo al llenado, los moldes fueron aceitados para facilitar el desmolde. Una vez preparado el mortero se llenaron las probetas inmediatamente. Con el molde unido a la mesa de la compactadora, se colocó directamente de la cubeta de la mezcladora, la primera de las dos capas de mortero en cada compartimento del molde metálico.

Se extendió la capa uniformemente, utilizando una espátula grande, pasándola a lo largo de cada compartimento del molde, hacia adelante y hacia atrás. Seguidamente se compactó la primera capa de mortero con 60 golpes con la compactadora (Figura 3.4). A continuación, se vertió la segunda capa de mortero, retirando los excesos con la espátula y se compactó la capa con otros 60 golpes.

Se retiró el molde de la mesa de sacudidas. Quitando el exceso de mortero con la espátula y se identificaron las probetas.

Se elaboraron 3 probetas por cada una de las 32 dosificaciones, totalizando 96 probetas.

En la figura 3.5 se presenta una vista general del total de las probetas elaboradas.



Figura 3. 5: Vista general del total de probetas desmoldadas elaboradas

3.4. – CURADO

Una vez realizadas las probetas se bajaron a la cámara húmeda ($t = 20^{\circ}\text{C}$ y $\text{H.R.} \geq 90\%$) para su conservación, quedando durante 7 días, siendo desmoldadas a las 24 horas (Figura 3.6).

Luego pasaron 28 días en ambiente de laboratorio (ambiente controlado con $t = 20^{\circ}\text{C}$ y $\text{H.R.} = 50\%$). Por último, se sometieron las probetas a cámara de carbonatación como se indica en 3.5



Figura 3. 6: Vista general de la cámara húmeda

3.5. – ENSAYOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Las probetas confeccionadas se colocaron en la cámara de carbonatación acelerada durante 28 días (Figura 3.7), excepto las probetas 1.1, 1.2 y 1.3 que se dejaron en ambiente de laboratorio, por tratarse de probetas de referencia.



Figura 3. 7: (a) Cámara de carbonatación acelerada y (b) vista de probetas desmoldadas dentro de la cámara de carbonatación acelerada

La cámara de carbonatación acelerada es una cámara ambiental con incubación, refrigeración, y control de humedad relativa utilizada (Marca: Thermoscientific de origen norteamericano), cumple con los requisitos de la Norma UNE-EN-13295:

- Temperatura $21^{\circ}\text{C} \pm 2$

- H.R. del 50 al 70%
- Porcentaje de CO₂ 1%.

Las principales características de la cámara son:

- Rango de Temperatura: 0°C a +60°C, seleccionable hasta la décima de grado.
- Control de HR ambiente hasta 95%
- Refrigeración: por compresor refrigerado por aire de 1/4HP.
- Uniformidad: +/- 0.3°C.
- Interior totalmente construido en acero inoxidable 202B.
- Amplio rango de accesorios opcionales para ajustar el equipo a la aplicación necesaria, como un accesorio de secado para alcanzar niveles de humedad debajo del ambiente, y sistema de control de CO₂.
- Capacidad: 822 litros.
- Sistema de control de CO₂ automático. Rango: de 0 a 20%, con precisión de 0,1%.
- Regulador de presión de CO₂ de 2 etapas
- 6 Estantes adicionales sólido de acero inoxidable y guías.

Para la determinación de la resistencia a la carbonatación de las probetas confeccionadas se siguieron las indicaciones de la Norma española UNE-EN 13295. El método se basa en la medida de la profundidad de carbonatación producida cuando se someten las probetas a una atmosfera con el 1% de CO₂, 21°C de temperatura y 60 % de HR durante 56 días.

Se prepararon las probetas prismáticas por triplicado del material a ensayar que luego se compararon con el de las probetas testigo que quedaron en ambiente de laboratorio.

Luego de la preparación y acondicionamiento, se colocaron las probetas en el interior de la cámara de carbonatación con el 1% de concentración de CO₂ gas durante 28 días en vez de 56. Se tuvo la previsión de que las cuatro caras quedaron expuestas a la acción del gas de ensayo, cuyo caudal se reguló con el objeto de obtener una presión positiva.

Se extrajeron de la cámara y se rompieron en dos partes colocándolas en la prensa como si fuera el ensayo de flexión.

La profundidad de carbonatación (d_k), tanto de las probetas que ingresaron a cámara de carbonatación como de las probetas testigo que quedaron en ambiente de laboratorio, se midieron luego de haber permanecido 28 días en la cámara de carbonatación acelerada.

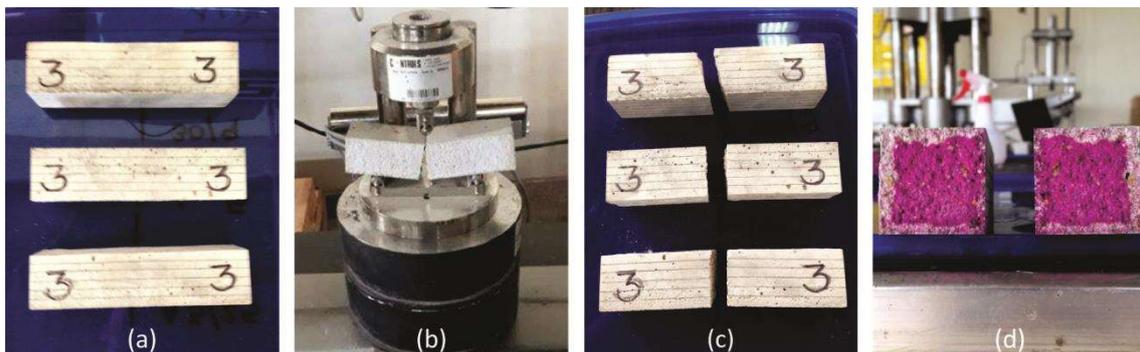


Figura 3. 8: (a) Probetas sanas, (b) prensa, (c) probetas rotas con prensa y (d) caras interiores rociadas con disolución indicadora de fenolftaleína

La profundidad de carbonatación se midió en las dos superficies rotas de la probeta inmediatamente después de su rotura. Cada trozo se roció con la disolución indicadora de fenolftaleína, que contenía 1 g del indicador de fenolftaleína en una disolución de 70 ml de etanol y 30 ml de agua desmineralizada (Figura 3.8). A continuación, se midió la profundidad de carbonatación, (60 ± 5) min después del rociado. La profundidad de carbonatación de la probeta (d_k) se calculó como la profundidad media en las cuatro caras laterales de cada una de las mitades de la probeta, medidas de acuerdo con el procedimiento operatorio que se describe a continuación; acorde con la Norma española UNE-EN 13295:

El resultado debería producir una coloración rosa uniforme en el hormigón no carbonatado de las cuatro caras laterales de la probeta.

Para cada superficie a ensayar, se dividió la longitud de la cara (40mm) en seis partes iguales, de tal modo que se obtuvieron cinco puntos interiores. Con ayuda de un calibre, se midió la profundidad de carbonatación en cada punto perpendicularmente a la

superficie, con una exactitud de 0,1mm (Figura 3.9.). La profundidad media de carbonatación de cada una de las caras laterales de la probeta se calculó a partir de los cinco valores individuales, redondeando al 0,5mm más próximo. Luego, se evaluó la medida en las otras tres caras laterales. La profundidad media de carbonatación (d_{k1} y d_{k2}) de cada parte de la probeta es la media de los cuatro valores correspondientes a sus cuatro caras laterales. La profundidad media de carbonatación de la probeta es la media de los valores de cada parte de ella [$d_k = (d_{k1} + d_{k2})/2$].

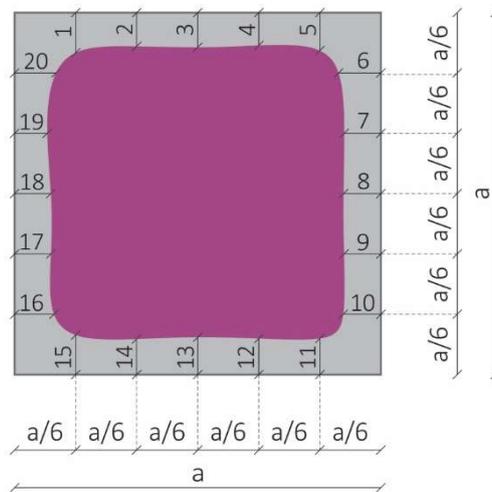


Figura 3. 9: Esquema de corte de una probeta y ubicación de puntos de registro de la profundidad de carbonatación

Seguidamente, se repitieron las medidas en las otras dos probetas con igual dosificación. Los valores correspondientes a la profundidad de carbonatación medida en las probetas duplicadas no deberían desviarse en más del 20%. Cuando la diferencia fue mayor al 20% se anotaron los dos valores en la tabla de resultados. En los casos en que la diferencia fue menor al 20%, se registró el valor medio en la tabla de resultados.

3.6. – ENSAYOS DE MICROSCOPIÁS

Para el análisis por microscopia electrónica de barrido (MEB), con electrones secundarios, las muestras fueron obtenidas por fractura, lo más plana posible, de las mitades de las muestras del ensayo de carbonatación. Antes del análisis mediante MEB las muestras fueron revestidas con una fina película de oro para evitar la generación de

cargas electrostáticas dañinas a la calidad de la imagen y permitir la disipación del calor producido por el bombardeo de electrones durante el análisis en el microscopio electrónico, lo cual fue realizado con el recubrimiento por pulverización catódica DESK II DENTON VACUUM y posteriormente se utilizó el equipo de microscopía de barrido JEOL JSM 5900LV, disponibles en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la Facultad de Ciencias, Universidad de la República (Figura 3.10).

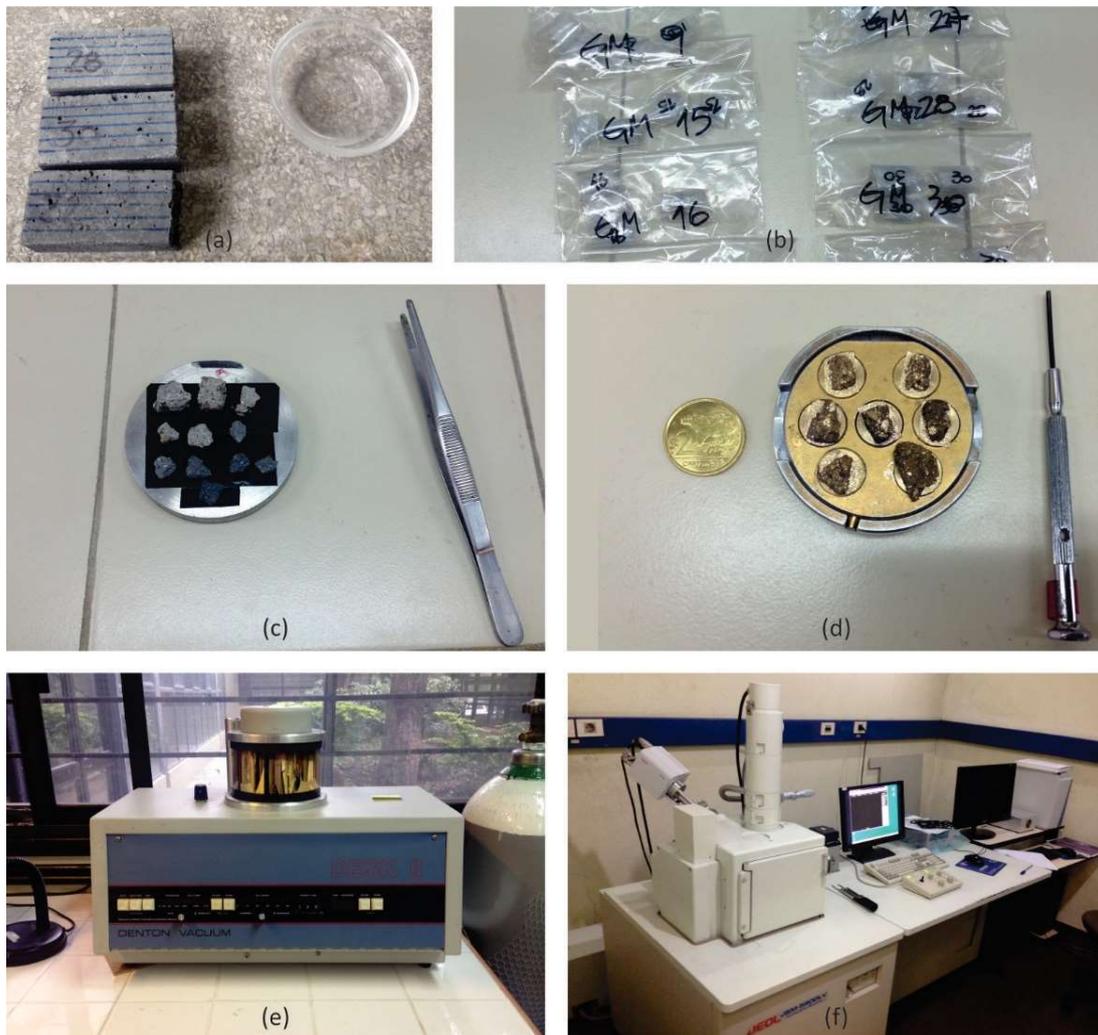


Figura 3. 10: (a y b) Preparación de muestras para MEB, (c) muestras a ensayar, (d) muestras revestidas de oro, (e) máquina para recubrimiento por pulverización catódica DESK II DENTON VACUUM y (f) equipo de microscopía de barrido JEOL JSM 5900LV

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la investigación experimental presentada en el Capítulo 3 y también su discusión. En Anexo se presentan fichas realizadas que contribuyeron para obtener claridad en relación a los resultados obtenidos y facilitar la discusión presentada en este capítulo, así como en la extracción de las conclusiones más importantes de esta Tesis.

4.1 – INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE LAS ADICIONES ESTUDIADAS EN LA CARBONATACIÓN

Tal como puede observarse en los resultados obtenidos que se muestran en la Figura 4.1, la incorporación de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación (Ficha N° 1 de Anexo D). Para las probetas sin filler calcáreo incorporado la profundidad de carbonatación es de 3.21 mm, sin embargo, para las probetas con adición de 30% de filler calcáreo la profundidad de carbonatación es de 9.21 mm, es decir un 187% mayor. Existe una correlación polinómica de grado 2 que se ajusta muy bien a los resultados experimentales, siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9893$ (muy cercano a 1).

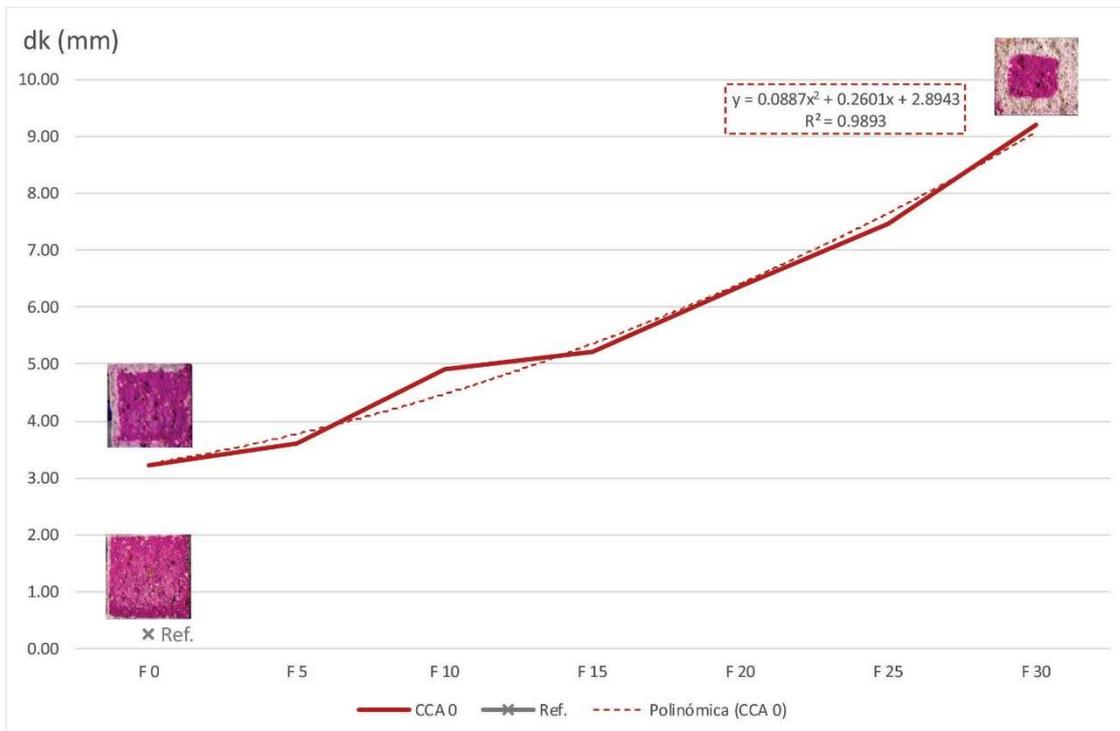


Figura 4. 1: Profundidad de carbonatación en probetas con distintos porcentajes de filler calcáreo

La incorporación de CCA ARROZUR aumenta la profundidad de carbonatación (Ficha N° 2 Anexo D). Cuanto mayor es la cantidad de CCA ARROZUR, mayor es la profundidad de carbonatación. Tal como puede observarse en Figura 4.2 dicha variación es un 113% mayor cuando se sustituye un 30% de Cemento Portland por CCA ARROZUR.

Existe una correlación lineal que se ajusta muy bien a los resultados experimentales, siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9661$.

Es de observar que el valor de profundidad de carbonatación en la probeta con 25% de CCA es muy similar al de la probeta con 20% de CCA por lo que pudo haber existido problemas de compactación al momento de la preparación de la probeta con 25% de CCA ARROZUR como se ve claramente en la Figura 4.3 registrándose CCA sin quemar.

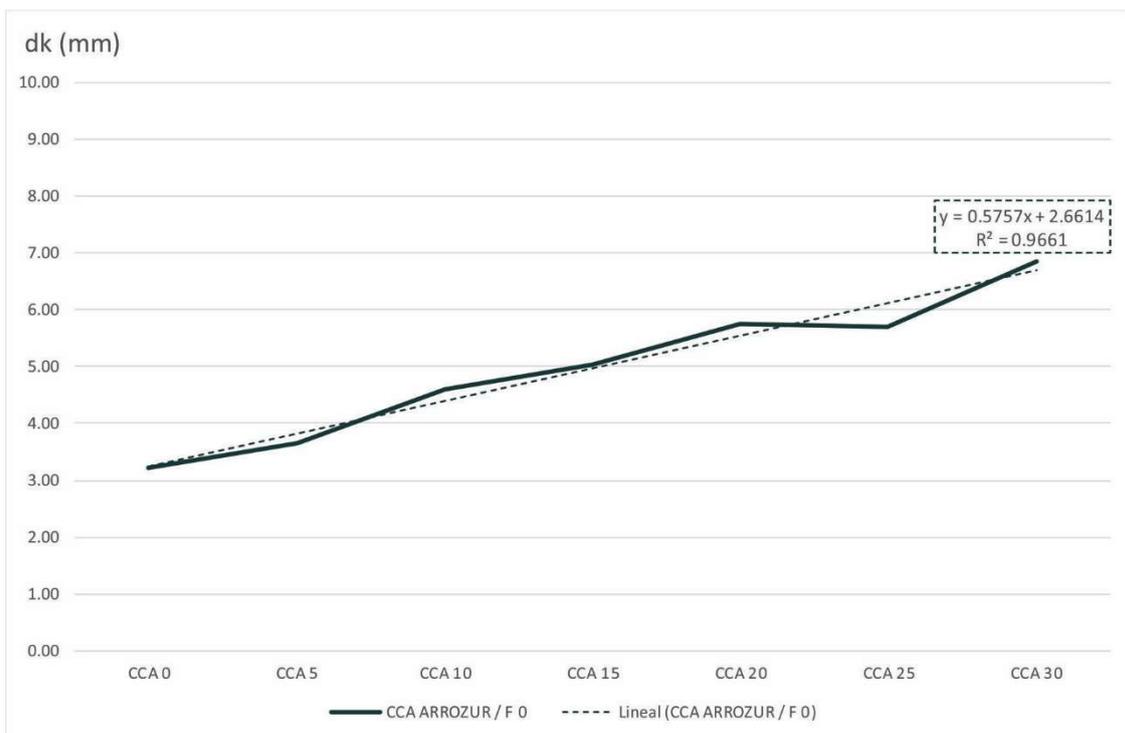


Figura 4. 2: Profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0

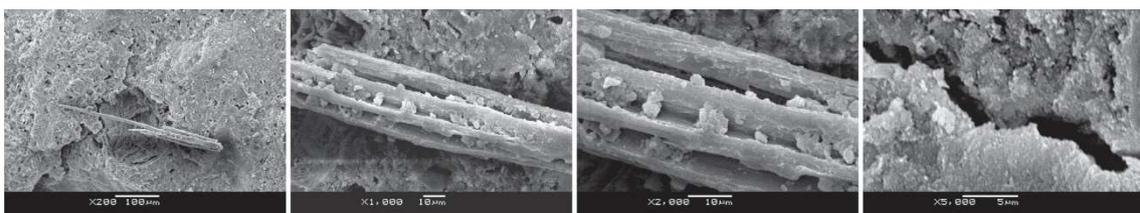


Figura 4. 3: MEB de probeta con 25% de CCA ARROZUR / F 0

La incorporación de CCA GALOFER aumenta la profundidad de carbonatación (Ficha N° 3 de Anexo D). Cuanto mayor es la cantidad de CCA, mayor es la profundidad de carbonatación. Tal como puede observarse en la Figura 4.4 dicha variación es un 104% mayor cuando se sustituye un 30% de Cemento Portland por CCA GALOFER.

Existe una excelente correlación entre los resultados experimentales y la ecuación polinómica de grado 2 que se presenta en la Figura 4.4, siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9917$ (muy cercano a 1).

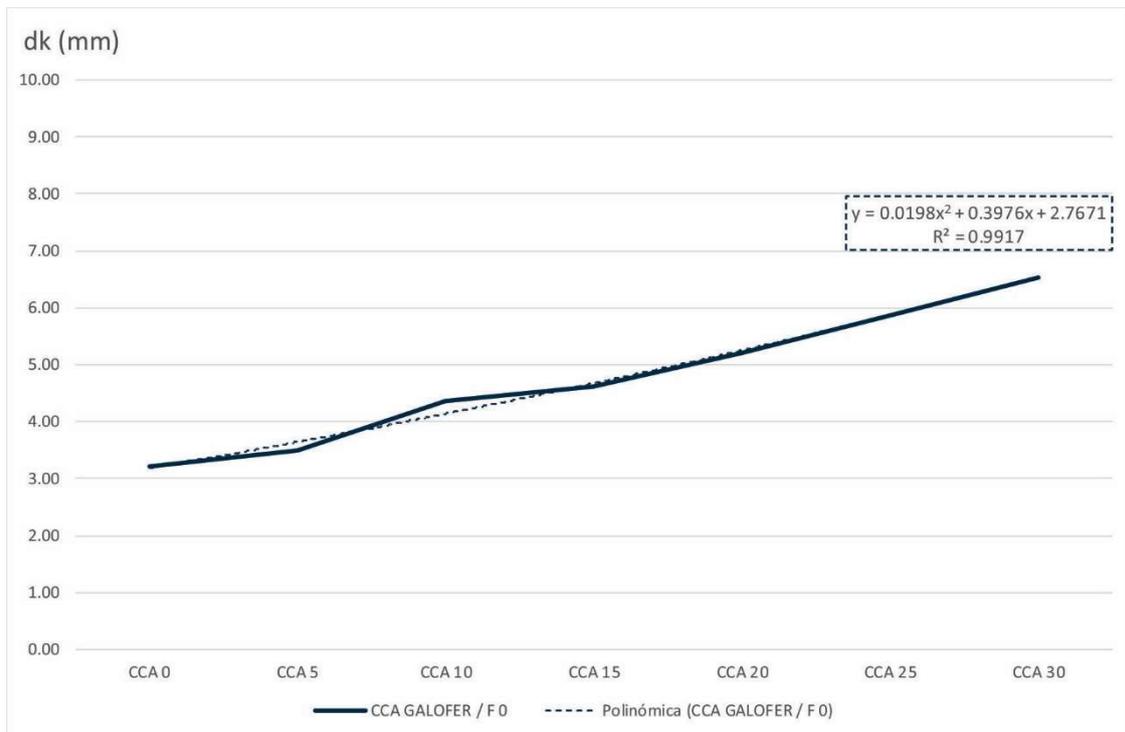


Figura 4. 4: Profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 0

Comparando los resultados obtenidos con las dos CCA utilizadas, sin adición de filler calcáreo, si bien la profundidad de carbonatación es mayor en las probetas con CCA ARROZUR que en las de CCA de GALOFER, ambas se comportan de manera similar ante el aumento de contenido de CCA tal como puede observarse en la Figura 4.5.

El porcentaje de variación de la profundidad de carbonatación entre ambos tipos de ceniza oscila entre el 3% y el 10% (Ficha N° 4 de Anexo D).

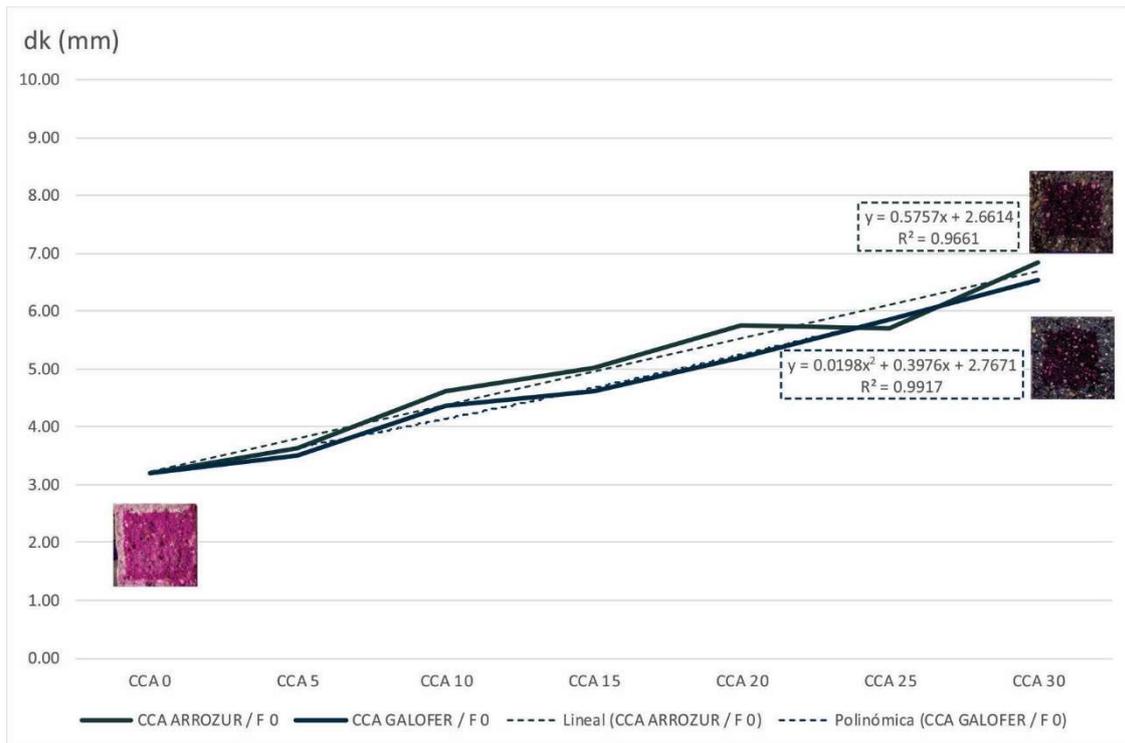


Figura 4. 5: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0 y CCA GALOFER / F 0

Ahora veremos la profundidad de carbonatación en las probetas con CCA con incorporación de 5% de filler calcáreo.

Tal como puede apreciarse en la Figura 4.6, cuanto mayor es la cantidad de CCA ARROZUR con mezcla con filler calcáreo, mayor es la profundidad de carbonatación. Dicha variación es un 152% mayor cuando se sustituye un 30% de Cemento Portland por CCA ARROZUR con 5% de filler calcáreo (Ficha N° 5 de Anexo D). Existe una muy buena correlación entre los resultados experimentales y la ecuación potencial que se presenta en la Figura 4.6, siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9592$.

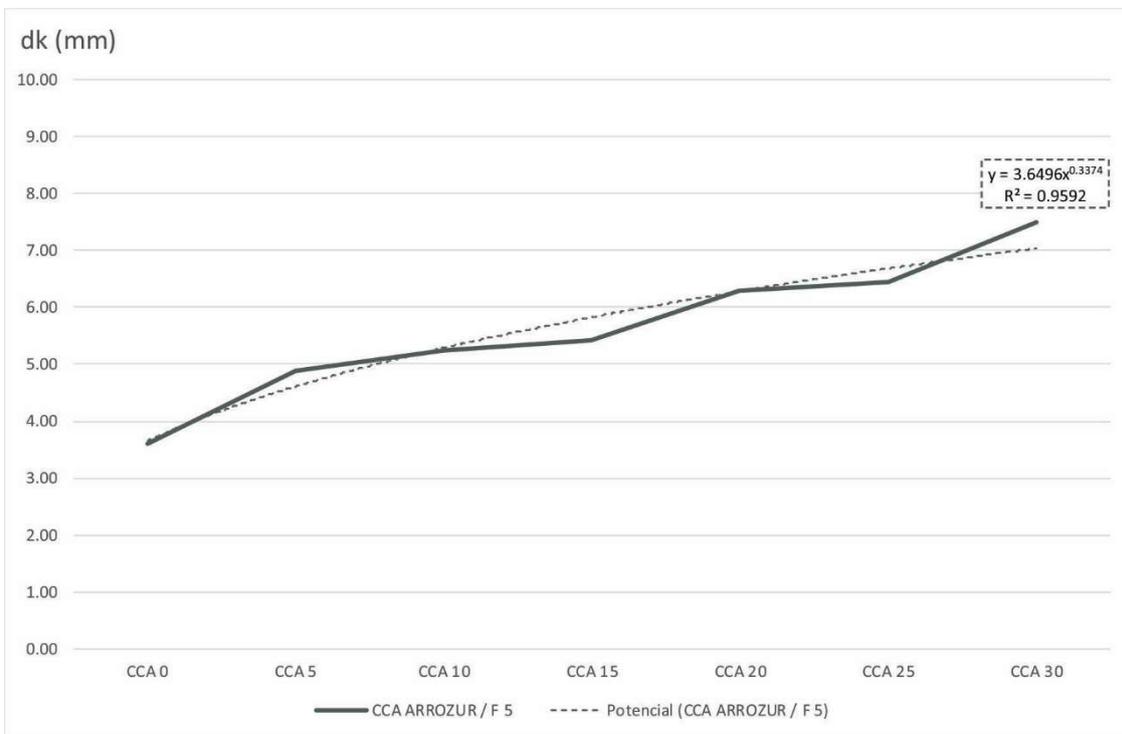


Figura 4. 6: Profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 5

Una situación similar puede comprobarse en las probetas con CCA GALOFER con incorporación de 5% de filler calcáreo. Cuanto mayor es la cantidad de CCA con mezcla con filler calcáreo, mayor es la profundidad de carbonatación (Ficha N° 6 de Anexo D). Tal como puede apreciarse en la Figura 4.7, dicha variación es un 171% mayor cuando se sustituye un 30% de Cemento Portland por CCA GALOFER con 5% de filler calcáreo. Existe una muy buena correlación entre los resultados experimentales y la ecuación potencial que se presenta en la Figura 4.7, siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9711$.

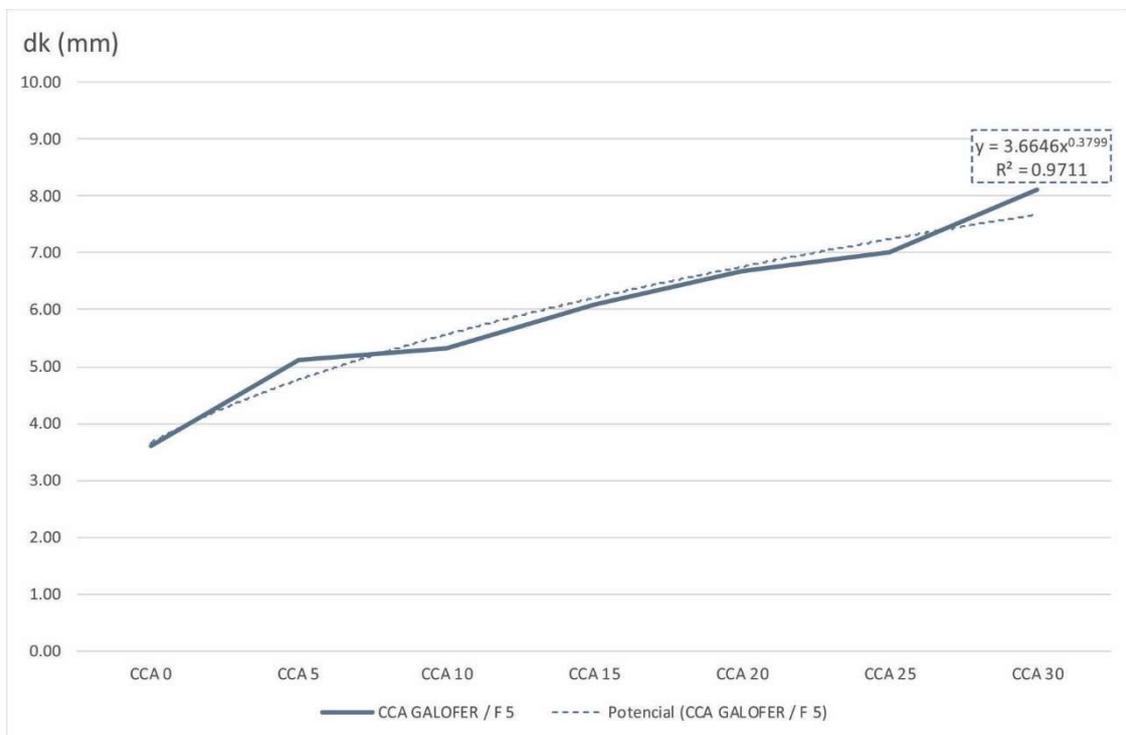


Figura 4. 7: Profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 5

Comparando los resultados obtenidos con las dos CCA utilizadas cuando se les incorpora filler calcáreo a las probetas, la profundidad de carbonatación tiene valores similares con bajos porcentaje de CCA. A medida que aumenta dicho porcentaje, cuando se emplea CCA GALOFER con incorporación de filler calcáreo, se observa mayor profundidad de carbonatación que cuando se utiliza CCA ARROZUR con 5% de filler, tal como puede observarse en la Figura 4.8. El porcentaje de variación de la profundidad de carbonatación entre ambos tipos de ceniza e idéntico porcentaje de filler calcáreo oscila entre el 1% y el 12% (Ficha N° 7 de Anexo D).

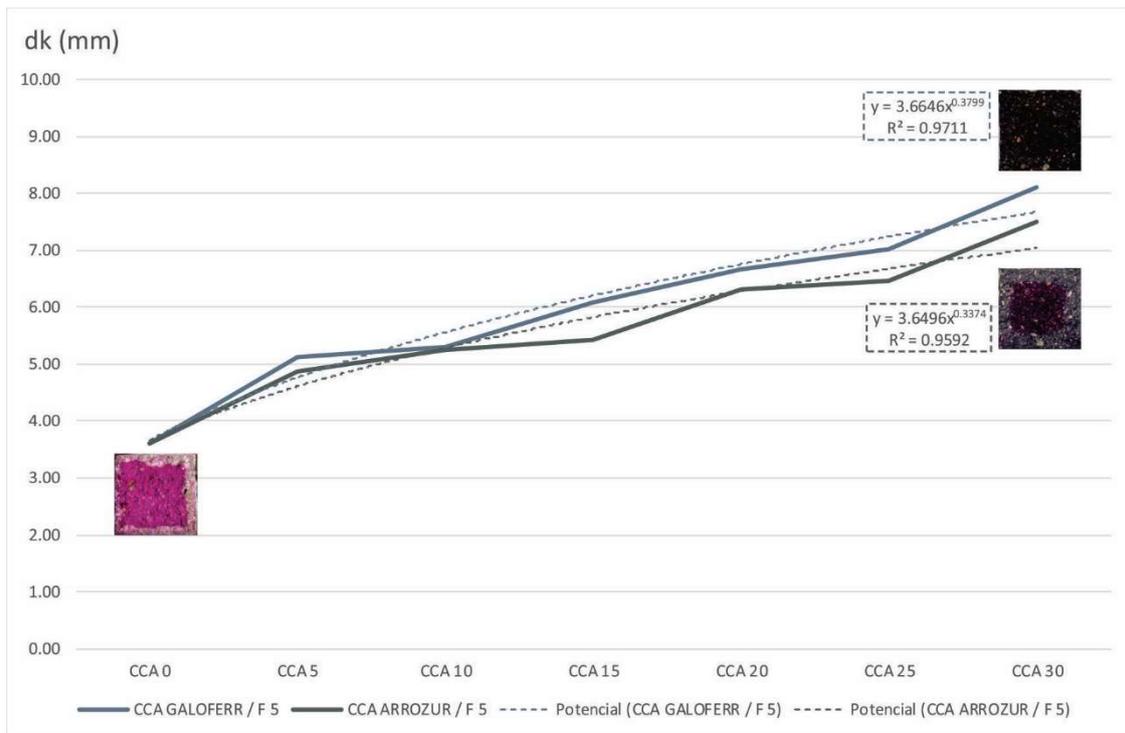


Figura 4. 8: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 5 y CCA GALOFER / F 5

En el Figura 4.9 se grafica la comparación de ambos casos de CCA ARROZUR con y sin incorporación de 5% de filler calcáreo.

Para el caso de CCA ARROZUR la profundidad de carbonatación aumenta con la incorporación tanto de CCA como de la mezcla de CCA con 5% de filler calcáreo (Ficha N° 8 de Anexo D). Dicho aumento se comporta de manera proporcional entre probetas con y sin mezcla de filler calcáreo excepto para las probetas con 15% de CCA y con 15% de CCA con 5% de filler calcáreo donde los resultados se observan similares (su porcentaje de variación es de un 8%). Lo anterior puede deberse a problemas de compactación de la probeta con 15% de CCA con 5% de filler calcáreo.

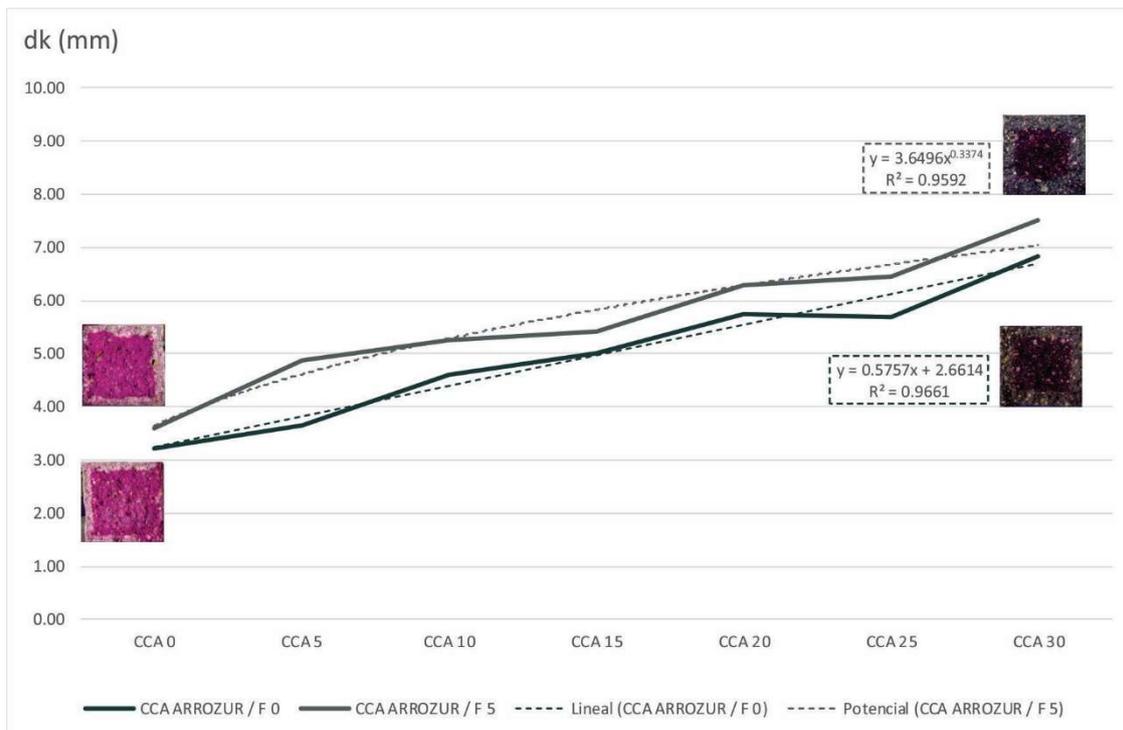


Figura 4. 9: Comparación profundidad de carbonatación en probetas CCA ARROZUR / F 0 y CCA ARROZUR / F 5

Comparando las probetas con contenido de CCA GALOFER con y sin incorporación de 5% de filler calcáreo, se observa que las que contienen filler calcáreo aumentan en mayor medida la profundidad de carbonatación (Figura 4.10). Dicho aumento se comporta de manera proporcional entre probetas con y sin mezcla de filler calcáreo excepto para la probeta con 5% de CCA y 5% de filler calcáreo, donde la diferencia de profundidad de carbonatación es del 46% (Ficha N° 9 de Anexo D). Lo anterior puede deberse a problemas de compactación de la probeta con 5% de CCA y 5% de filler calcáreo.

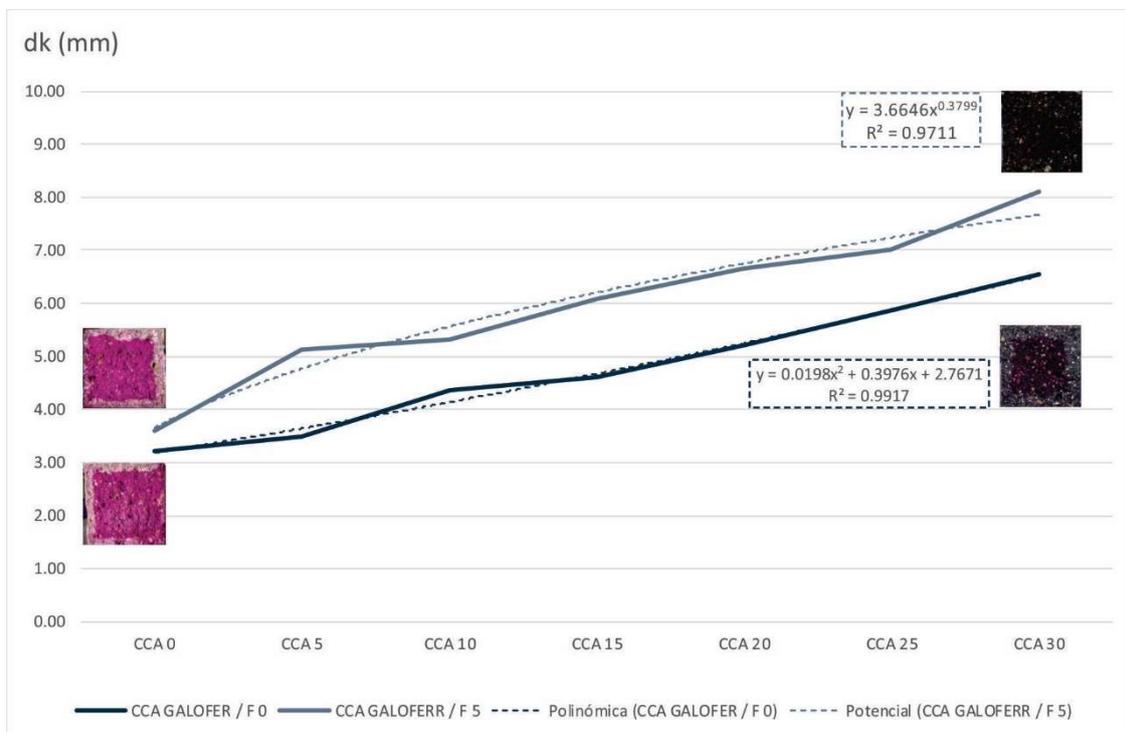


Figura 4. 10: Comparación profundidad de carbonatación en probetas CCA GALOFER / F 0 y CCA GALOFER / F 5

La conclusión en cuanto a las adiciones empleadas indica que tanto el filler calcáreo (FC) como los dos tipos de CCA utilizadas (ARROZUR y GALOFER) aumentan la profundidad de carbonatación. La que más aumenta la profundidad de carbonatación es el FC, luego las que contienen CCA GALOFER + FC, CCA ARROZUR + FC, CCA ARROZUR y por último las que contienen CCA GALOFER (Figura 4.11).

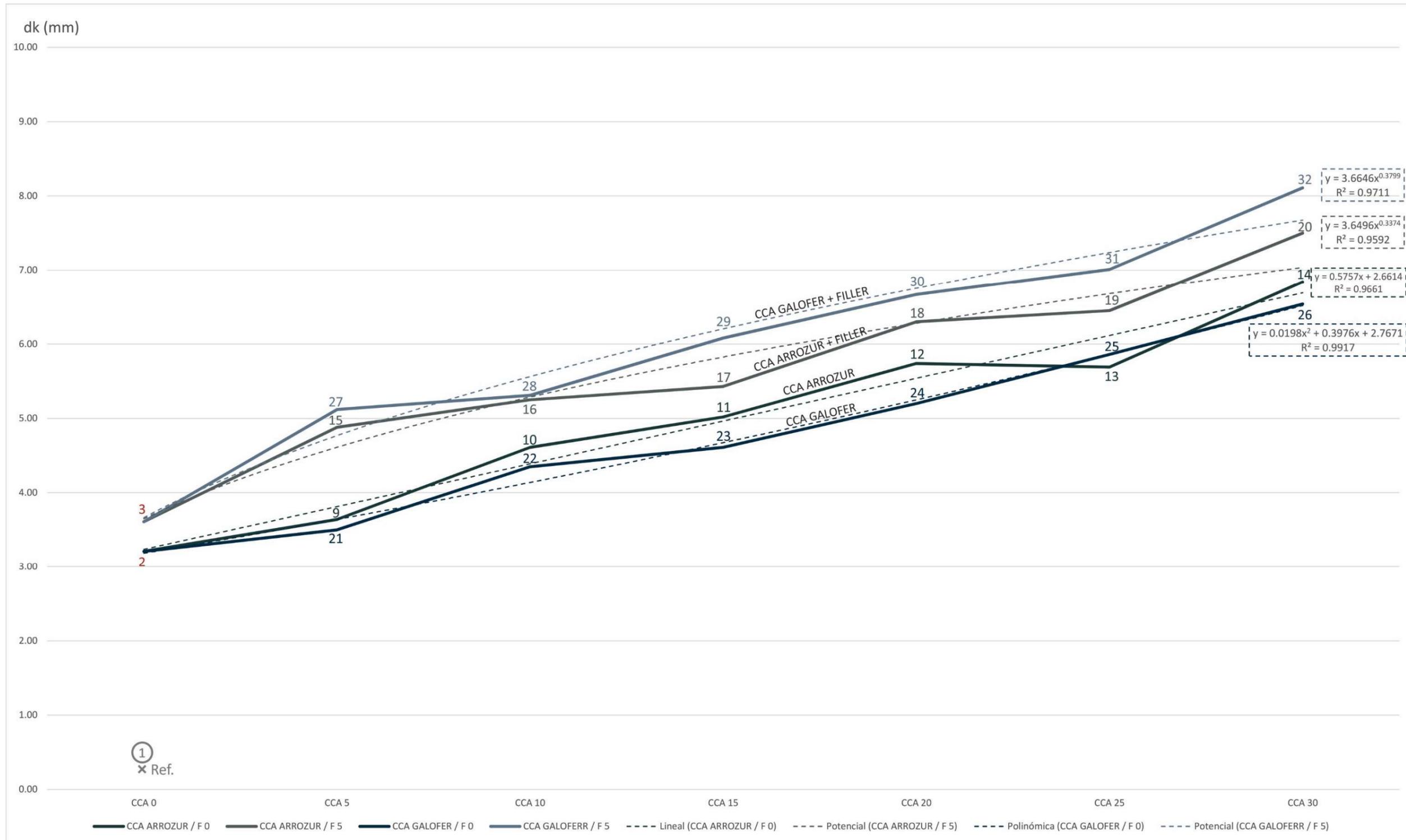


Figura 4. 11: Comparación de profundidad de carbonatación en probetas: CCA Arrozur / F 0, CCA Arrozur / F 5, CCA Galofer / F 0 y CCA Galofer / F 5

Tal como puede observarse en la Tabla 4.1 el porcentaje de incremento de la carbonatación en mezclas binarias sólo con CCA (tanto ARROZUR como GALOFER), es menor que en las probetas con incorporación únicamente de filler calcáreo. Con un 30% de sustitución de Cemento Portland por filler calcáreo, la profundidad de carbonatación fue de 9.21mm. Sin embargo, con un 30% de sustitución de Cemento Portland por CCA ARROZUR la profundidad de carbonatación fue de 6.84mm y con CCA GALOFER fue de 6.54mm.

Puede observarse que, en las mezclas ternarias con incorporación de 5% de filler calcáreo a la CCA ARROZUR, el incremento de la profundidad de carbonatación es menor que en las mezclas binarias (que contienen únicamente CCA ARROZUR). Para un 30% de sustitución (25% CCA ARROZUR + 5% FC), el incremento de la profundidad de carbonatación fue del 79%.

Para el caso de las mezclas ternarias con CCA GALOFER y 5% filler calcáreo, el comportamiento fue distinto ya que con porcentajes de sustitución que van del 5% al 25%, el incremento de la profundidad de carbonatación se mantuvo con valores muy similares a los de las mezclas binarias con CCA GALOFER únicamente. Sin embargo, para un 30% de sustitución (25% CCA GALOFER + 5% FC), el incremento de la profundidad de carbonatación fue del 94%, menor al valor de mezcla binaria.

SUSTITUCIÓN CP [%]	FC	ARROZUR		GALOFER	
		Sólo CCA	CCA + 5%FC	Sólo CCA	CCA + 5%FC
0	-	-	-	-	-
5	12	13	12	9	12
10	53	44	35	36	42
15	62	56	45	44	47
20	98	70	50	62	68
25	132	77	75	83	85
30	187	113	79	104	94
35	-	-	108	-	125

Tabla 4. 1: Incremento de la carbonatación en relación a la referencia sin CCA y sin FC

Los resultados muestran un mejor comportamiento de las mezclas ternarias con CCA ARROZUR + 5% FC que las mezclas binarias ya que el incremento de la profundidad de

carbonatación es menor; y en el caso de las mezclas ternarias con CCA GALOFER + 5% FC el comportamiento es mejor únicamente con 30% de sustitución, en los restantes porcentajes de sustitución los valores se incrementaron obteniendo resultados similares tanto en mezclas binarias como en terciarias.

4.2 – MICROSCOPIAS ELECTRÓNICAS DE BARRIDO

A efectos de determinar si existe una relación entre la profundidad de carbonatación y los componentes utilizados en la confección del mortero de cemento se realizaron MEB en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la Facultad de Ciencias (UdelaR).

En el Anexo E se encuentran las MEB presentadas en este capítulo en un tamaño mayor para su mejor apreciación.

A continuación, se presentan MEB de las probetas de referencia sin CCA ni filler calcáreo que si bien tienen la misma edad, las que se muestran en la Figura 4.12 no ingresaron a la cámara de carbonatación acelerada y se mantuvieron en ambiente de laboratorio, mientras que las que se presentan en la Figura 4.13 se introdujeron en la cámara de carbonatación acelerada.

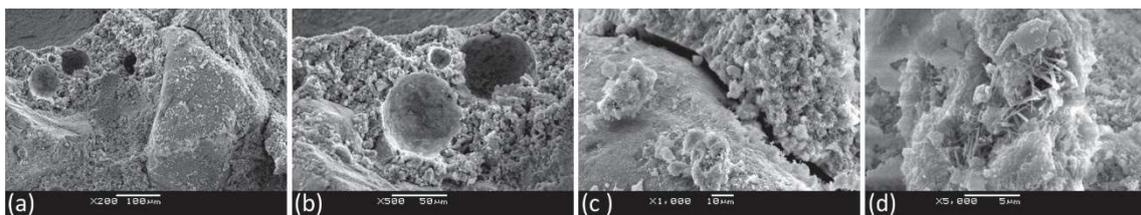


Figura 4. 12: MEB de probeta de Ref. CCA 0 / F 0 que se mantuvo en ambiente de laboratorio

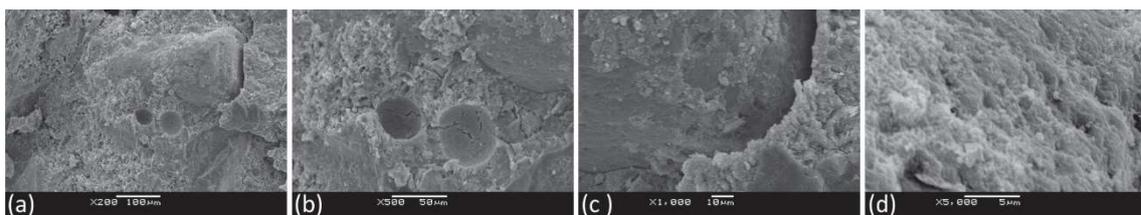


Figura 4. 13: MEB de probeta CCA 0 / F 0 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

De la observación de ambas figuras surge que:

(a) En ambos casos se observan poros.

(b) Se observan poros de mayor dimensión en la probeta de referencia (Ref.: 68 μm y 73 μm) que en la que ingresó a la cámara de carbonatación (CCA 0 / F 0: 40 μm y 50 μm).

En ambos casos los poros presentan fisuras. Las fisuras son más importantes en la probeta que ingresó a cámara de carbonatación

(c) Se observa presencia de agregados con mayor zona de transición en la probeta CCA 0 / F 0 que ingresó a cámara de carbonatación.

(d) Presencia de etringita (sulfoaluminato de calcio hidratado) en probeta de referencia.

Como conclusión se puede observar que las probetas que fueron sometidas a cámara de carbonatación acelerada presentan una mayor zona de transición y fisuras más importantes que las probetas que no ingresaron a la cámara de carbonatación acelerada y permanecieron en ambiente de laboratorio. Por lo que podemos afirmar que la carbonatación influye en la microestructura de las muestras observadas.

A los efectos de ilustrar mejor la influencia de la incorporación del filler calcáreo, en la Figura 4.14 se presentan MEB de probetas sin CCA con y sin incorporación de 5% de filler calcáreo. Se observan poros de mayor dimensión (95 μm) en las probetas con 5% de adición de filler calcáreo que en las probetas sin filler calcáreo (40 μm y 50 μm).

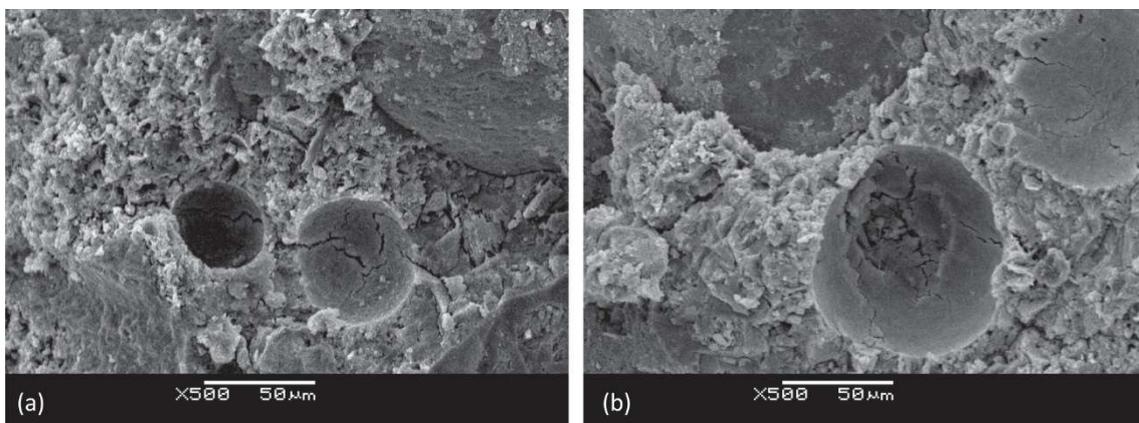


Figura 4. 14: MEB de probetas (a) CCA 0 / F 0 y (b) CCA 0 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

A continuación, se presentan MEB de las muestras elaboradas con 10% de CCA ARROZUR con y sin adición del 5% de filler calcáreo (ambas ingresaron a la cámara de carbonatación acelerada).

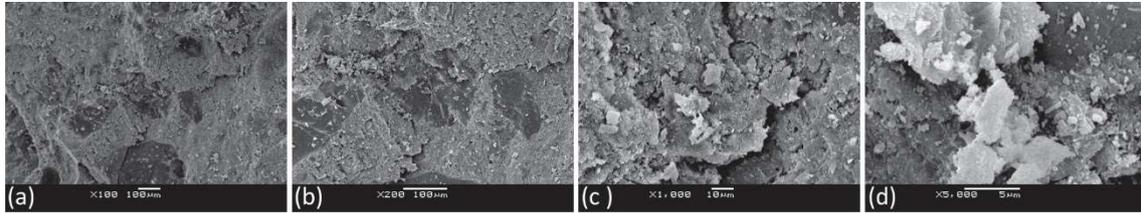


Figura 4. 15: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 0 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

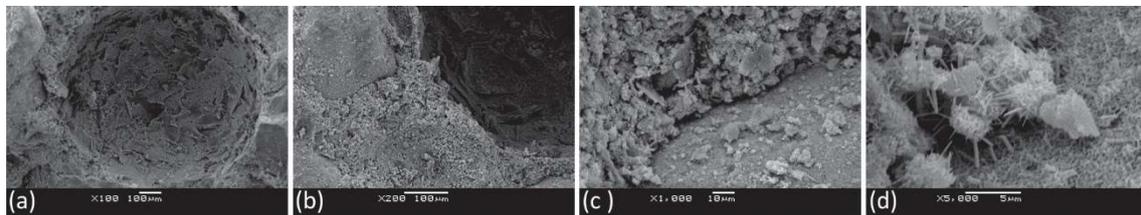


Figura 4. 16: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

De la observación de ambas figuras surge que:

(a) En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 0 se observa una estructura compacta, sin fisuras.

En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 se observan poros grandes (900 μm).

(b) En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 0 se observan muchos agregados.

En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 se observa un borde de aspecto límpido y agregados con zona de transición demarcada.

(c) En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 se observa una zona de transición relativamente fina con agregado que no presenta muchas fisuras transversales.

(d) En la probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 se observan pequeños cristales de etringita (sulfoaluminato de calcio hidratado) cortos pero gruesos.

Pudiéndose concluir que con la incorporación de filler calcáreo, si bien este rellena poros, al no integrarse a los productos de la hidratación del Cemento Portland, le hace perder compacidad a la estructura, aumentando la carbonatación, lo cual se hizo evidente en la figura 4.14, observándose también presencia de zonas de transición demarcadas que, aunque no presentan muchas fisuras transversales, influirán en las propiedades del material que se elabore con CCA y filler calcáreo.

En la Figura 4.17 se presentan MEB de muestras elaboradas con 5% y 20% de CCA ARROZUR respectivamente con incorporación de 5% de filler calcáreo. Se observan poros de mayor dimensión en las probetas con menor cantidad de CCA, lo cual muestra el refinamiento de la estructura que brindan los mayores contenidos de CCA.

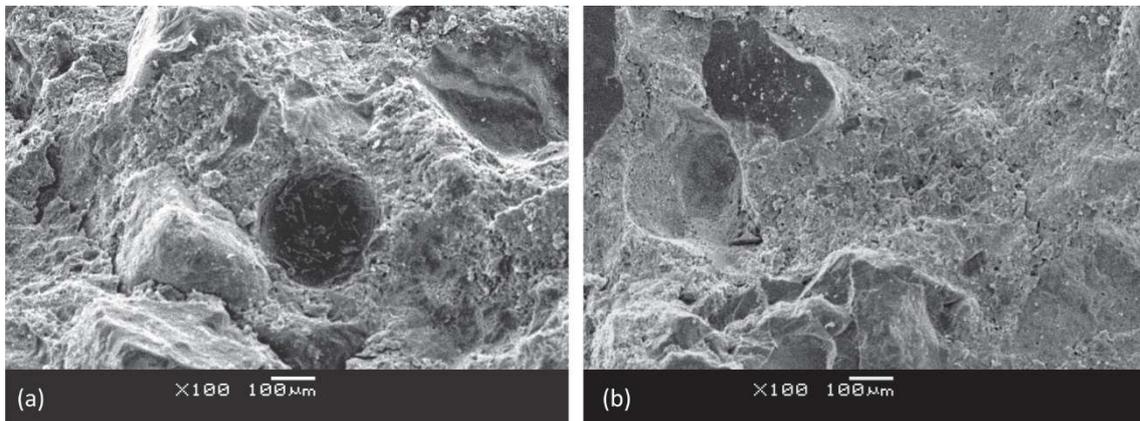


Figura 4. 17: MEB de probeta CCA ARROZUR 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se presentan MEB de las muestras elaboradas con 5%, 10% y 20% de CCA GALOFER con incorporación de 5% de filler calcáreo respectivamente que ingresaron a la cámara de carbonatación acelerada.

De la observación de las figuras surge que:

(a) Los poros son mayores en las probetas con menor cantidad de CCA.

(b) y (c) A medida que aumenta el porcentaje de CCA GALOFER se va refinando la microestructura:

- La microestructura de la probeta CCA GALOFER 10 / F 5 es más fina que la de la Probeta CCA GALOFER 5 / F 5.

- La microestructura de la probeta CCA GALOFER 20 / F 5 es más fina que la de la Probeta CCA GALOFER 10 / F 5.

(d) Se observa presencia de etringita (sulfoaluminato de calcio hidratado) en las tres probetas.

De lo anterior se puede concluir que cuanto mayor es el contenido de CCA, menor es la cantidad de poros, siendo éstos de tamaños menores por lo que se obtiene un mayor refinamiento de la microestructura.

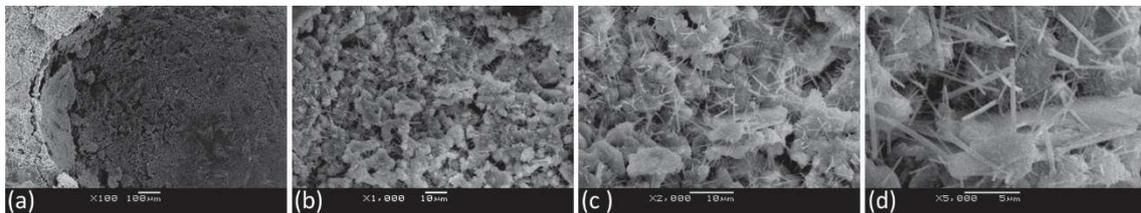


Figura 4. 18: MEB de probeta CCA GALOFER 5 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

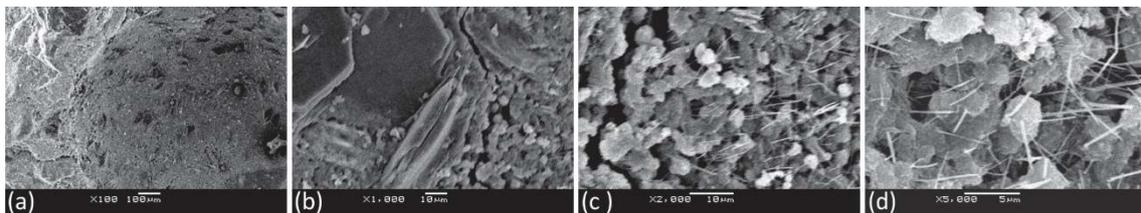


Figura 4. 19: MEB de probeta CCA GALOFER 10 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

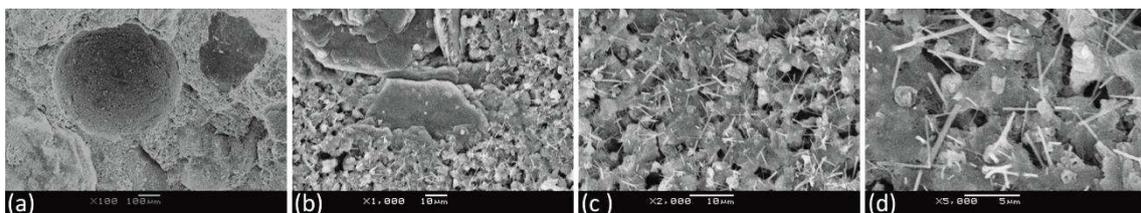


Figura 4. 20: MEB de probeta CCA GALOFER 20 / F 5 luego de ser expuesta a la cámara de carbonatación acelerada

En la Figura 4.21 se presentan MEB de las muestras elaboradas con 10% y 25% de CCA GALOFER respectivamente con incorporación de 5% de filler calcáreo que ingresaron a la cámara de carbonatación acelerada. Se observa claramente que cuanto mayor es el porcentaje de CCA se tiene una microestructura más refinada llegando a no tener una zona de transición marcada en el caso de probetas con 25% de CCA.

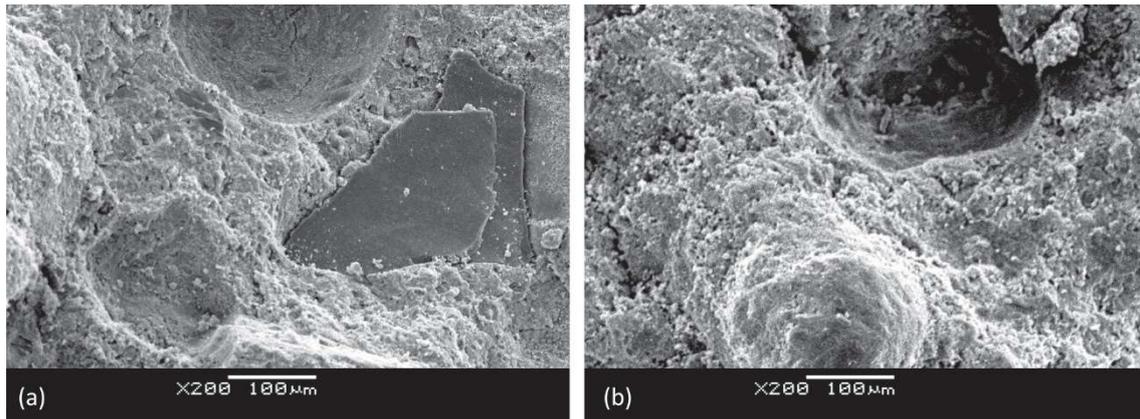


Figura 4. 21: MEB de probetas (a) CCA GALOFER 10 / F 5 y (b) CCA GALOFER 25 / F 5 luego de ser expuestas a la cámara de carbonatación acelerada

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivo general estudiar los efectos de la carbonatación para el caso específico de morteros de cemento con adición de dos tipos de CCA generadas en nuestro país (ARROZUR y GALOFER), las cuales fueron provistos por las empresas productoras del residuo y se obtienen sin combustión controlada mediante diferentes procesos industriales. Uno de ellos es un residuo del uso de la cáscara de arroz como combustible para generar vapor en el proceso de parbolizado del arroz (CCA ARROZUR). El otro es un residuo del uso de la cáscara de arroz como biomasa para la generación de energía eléctrica (CCA GALOFER). Para prepararlos para su uso en el cemento, fue necesario someterlas a operaciones de secado simples (ya que ambas CCA tenían una humedad superior al 3%), tamizado (para eliminar impurezas como cáscaras de arroz no quemadas, agregados, etc.) y molienda (para adquirir puzolanidad), (Rodríguez de Sensale, Rodríguez Viacava, 2018).

Paralelamente se estudió la influencia de la incorporación de filler calcáreo y fue hecho un estudio comparativo de los resultados obtenidos con 5% de filler calcáreo con ambas CCA a los efectos de complementar estudios realizados sobre Cemento Portland Compuesto (CPC) en el proyecto ANII FSE 1-2011-1-6476.

Por último, se realizaron microscopías electrónicas de barrido (MEB) para determinar la relación entre la profundidad de carbonatación y los componentes utilizados en la confección de los morteros realizados.

Las conclusiones que se presentan a continuación, aunque están en consonancia con la mayor parte de la bibliografía existente en la temática, no deben ser tomadas de forma absoluta pues se refieren solamente a los datos obtenidos de morteros que utilizaron tipos, cantidades y calidades específicas de materiales y técnicas de ejecución. Su representatividad debe ser confirmada mediante la ejecución de nuevas investigaciones que presenten resultados que puedan complementar y confirmar los datos obtenidos en este estudio.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de carbonatación acelerada, de las comprobaciones estadísticas, y de los ensayos de la microestructura de los morteros, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

5.1 – EN RELACIÓN A LOS ENSAYOS DE CARBONATACIÓN ACELERADA

- La adición de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación, lo cual concuerda con la bibliografía relativa a la temática; la profundidad de carbonatación media de probetas de referencia (sin CCA ni filler calcáreo) fue de 3.21mm mientras que las de probetas con incorporación de 30% de filler calcáreo fue de 9.21mm, es decir casi tres veces mayor. Según Elgalhud et al. (2017), cuando se emplea filler calcáreo la carbonatación puede reducirse aumentando su finura y/o con curado húmedo extendido en el tiempo, o en caso contrario, disminuyendo la cantidad de filler calcáreo utilizado.

- La incorporación de los dos tipos de CCA utilizadas (ARROZUR y GALOFER) también aumenta la profundidad de carbonatación. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Gastaldini et al. (2007), quienes observaron la misma tendencia en su trabajo que fue presentado en el Capítulo 2 de esta Tesis, así como por otros investigadores cuyos trabajos sobre los efectos del empleo de CCA en la carbonatación se comentan en ese mismo capítulo.

- Si bien el empleo de CCA aumenta la profundidad de carbonatación, lo hace en menor porcentaje que el filler calcáreo. Con 30% de CCA ARROZUR la profundidad de carbonatación es 6.84mm, con 30% de CCA GALOFER es de 6.54mm mientras que con 30% de filler calcáreo es de 9.21mm

- Cuando se emplea CCA ARROZUR sustituyendo parte del Cemento Portland se tiene mayores profundidades de carbonatación que con CCA GALOFER.

- Al incorporar 5% de filler calcáreo conjuntamente con la CCA la situación se revierte, observándose mayor profundidad de carbonatación cuando se emplea CCA GALOFER que con CCA ARROZUR.

- Se obtuvieron modelos de previsión de la carbonatación, para las condiciones experimentales de este trabajo, cuyos coeficientes R^2 fueron excelentes (muy próximos

a 1). Cuando se emplea CCA ARROZUR la función lineal se aproximaba muy bien a los resultados obtenidos experimentalmente cuando no se empleaba filler calcáreo, mientras que con 5% de filler calcáreo el ajuste potencial era el más adecuado. Cuando se emplea CCA GALOFER, sin filler calcáreo, se ajustaban muy bien los resultados con una función polinómica de grado 2; mientras que con 5% de filler calcáreo el ajuste potencial fue el más adecuado.

5.2 – EN RELACIÓN A LOS ENSAYOS MICROESTRUCTURALES

- Las probetas que fueron sometidas a cámara de carbonatación acelerada presentaron una mayor zona de transición y fisuras más importantes que las probetas que permanecieron en ambiente de laboratorio (sin ingresar a la cámara de carbonatación acelerada). Por lo que se puede afirmar que la carbonatación influye en la microestructura de las muestras estudiadas.

- Cuando se emplea filler calcáreo se observaron poros de mayor dimensión con 5% de sustitución de Cemento Portland que en las probetas de referencia sin filler calcáreo.

- Si bien el filler calcáreo rellena poros, al no integrarse a los productos de la hidratación del Cemento Portland le hace perder compacidad a la estructura, aumentando la carbonatación, observándose también presencia de zonas de transición demarcadas que, aunque no presentan muchas fisuras transversales, influirán en las propiedades del material que se elabore con CCA y filler calcáreo.

- Cuanto mayor es el contenido de CCA, menor es la cantidad de poros, siendo éstos de tamaños menores por lo que se obtiene un mayor refinamiento de la microestructura.

- Comparando muestras elaboradas con 5% y 20% CCA ARROZUR con incorporación de 5% de filler calcáreo se observaron poros de mayor dimensión en las probetas con menor contenido de CCA, mientras que con mayores contenidos de CCA se evidenciaba refinamiento de la microestructura, mostrando los beneficios que brindan los mayores contenidos de CCA.

5.3 – CONSIDERACIONES FINALES

En nuestro país el cemento Portland con filler calcáreo (CPF) se comercializó, dejó de comercializarse y se ha vuelto a comercializar recientemente, por parte de la empresa estatal de cemento. El filler calcáreo empleado en esta tesis procede de la misma fábrica que elabora ese tipo de cemento en nuestro país; según información suministrada por el Químico encargado de una de las dos plantas de cemento de la empresa estatal, se pudo pasar de CPF30 a CPF40 mediante el empleo de 20% de filler calcáreo. De acuerdo a resultados obtenidos en esta tesis, con ese porcentaje se obtiene una profundidad de carbonatación de 6.37mm que es casi el doble que la obtenida con CPN (cemento Portland Normal); con 20% de CCA procedente de ARROZUR o de GALOFER en esta tesis se obtuvieron 5.74mm y 5.20mm de profundidad de carbonatación respectivamente, siendo estos valores menores que los obtenidos con el empleo de filler calcáreo. Por lo que sería viable elaborar cemento portland puzolánico (CPP) con el mismo porcentaje de sustitución de cemento que con el CPF obteniendo mejores prestaciones ya que se tendría menor profundidad de carbonatación y mejores propiedades mecánicas debido a la reacción puzolánica. En relación a ello cabe observar que se podría elaborar CPP con sustitución un poco menor al 30% de clínker por CCA teniendo similar carbonatación que con el CPF, pero con mayor porcentaje de sustitución de cemento por CCA y menores emisiones de CO₂ al ambiente para su elaboración.

5.4 – SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Con el objetivo de complementar el presente trabajo y continuar en el desarrollo de la temática abordada, son hechas algunas propuestas de trabajos para futuras investigaciones:

1) En morteros:

- Estudio de la carbonatación acelerada extendida en el tiempo.
- Estudio de la carbonatación acelerada de morteros realizados con el mismo cemento y dosificación empleada en este trabajo, pero con distintas adiciones obtenidas por el tratamiento de otros residuos a los efectos de poder comparar los resultados con los de esta Tesis.

- Estudio de la carbonatación acelerada de morteros realizados con los distintos tipos de cemento que se están comercializando actualmente en nuestro país.

2) En hormigones:

- Estudio de los efectos de la incorporación de CCA en la carbonatación de hormigones convencionales.

- Estudio de los efectos del empleo de filler calcáreo en la carbonatación de hormigones convencionales.

- Estudio de los efectos de mezclas ternarias (cemento+CCA+filler) calcáreo en la carbonatación de hormigones convencionales.

- Estudio de los efectos del empleo de los distintos tipos de cemento que se están comercializando en nuestro país en la carbonatación de hormigones convencionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Cultivadores de Arroz. Evolución del cultivo de arroz. Disponible en <http://aca.com.uy/datos-estadisticos>

Antiohos, S.K.; Tapali, J.G.; Zervaki, M.; Sousa-Coutinho, J.; Tsimas, S. Papadakis, V.G. *Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study*. Construction and Building Materials 49, 455-463, 2013.

Ayub, R.; Shafiq, N.; Khan, S.U.; Nuruddin, M.F. *Durability of concrete with different mineral admixtures: A review*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 7, N° 8, 2013.

Bijen, J.; van der Wegen, G.; and van Selst, R. *Carbonation of Portland Blast Furnace Slag Cement Concrete with Fly Ash*. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP14, Malhotra, V.M., Ed., 645-668, 1989.

Bucher, R.; Diederich, P.; Escadeillas, G.; Cyr, M. *Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation. Comparison with blended cement containing fly ash, blast furnace slag and limestone filler*. Cement and Concrete Research 99, 18-29, 2017.

Cabrera, O.A.; Traversa, L.P.; Ortega, N.F. *Carbonatación de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados finos*. La Plata, Argentina, 2015.

Calleja Carrete, J. *Cementos para obras marítimas*. Cemento Hormigón, ISSN 0008-8919, N° 787, 927-952, 1998.

Campbell, D.H.; Sturm, R.D.; Kosmatka, S.H. *Detecting Carbonation*. Concrete Technology Today, PL 911, Portland Cement Association, Vol. 12, No. 1, pp. 1-5, March 1991.

Chatveera, B.; Lertwattanaruk P. *Durability of conventional concretes containing black rice husk ash*. Journal of Environmental Management 92, pp. 59-66, 2011.

Chiecchi, R. *La carbonatación del hormigón: desarrollo y efectos en ambientes con alto contenido de dióxido de carbono (CO₂)*. Trabajo final de Diplomado de Construcción de

Obras de Arquitectura. Facultad de Arquitectura. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay, 2010.

Chindaprasirt, P.; Rukzon, S. *Pore Structure Changes of Blended Cement Pastes Containing Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash Caused by Carbonation*. Journal of Materials in Civil Engineering 21 (11); 666-671; 2009.

Colleparidi, M.; Colleparidi, S.; Ogoumah Olagot, J.J.; Simonelli, F. *The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes*. Conferencia: Proc. Of 8th CANMET/ACI Int. Conf. On Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 23-29, 2004.

Detwiler, R.J.; Bhatti, J.I.; Bhattacharja, S. *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements*. PCA Research and Development Bulletin RD112T. PCA R&D Serial No. 2038, 1996.

Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.; McCarthy, M.J.; Chaipanich, A. *Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction*. Materials and Structures 40, 459-473, 2007.

Elgalhud, A.; Dhir, R.K.; Ghataora, G.S. *Carbonation resistance of concrete: limestone addition effect*. Magazine of Concrete Research, 69 (2), 84-106, 2017.

Gastaldini, A.L.G.; Isaia, G.C.; Gomes, N.S. Sperb, J.E.K. *Chloride penetration and carbonation in concrete with rice husk ash and chemical activators*. Cements & Concrete Composites 29, pp. 176-180, 2007.

Grimaldi, G.; Carpio, J.; Raharinaivo, A. *Effect of Silica Fume on Carbonation and Chloride Penetration in Mortars*. Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete Supplemental Papers, Alasali, Mohammed, Ed., 320-334, 1989.

Hoppe, A.E. *Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem*. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Brasil, 2008.

Hossain, M.M.; Karim, M.R.; Hasan, M.; Hossain, M.K.; Zain, M.F.M. *Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review*. Construction and Building Materials 116, pp. 128-140, 2016.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. *UNIT 20:2015. Cementos portland para uso general. Definiciones y requisitos*. Uruguay, 2015.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. *UNIT ISO 679:2009. Método de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas*. Uruguay, 2009.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. *UNIT 1047:1999. Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos*. Uruguay, 2009.

Isaia, G.C.; Vagheti, M.; Gastaldini, A.L.G. *Concrete carbonation with ternary pozzolanic mixtures*. Supplementary Papers of the Proceedings in: 5th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Malhotra, V.M. (ed.), 157-172, 2000.

Isaia, G.C.; Zerbino, R.L.; Gastaldini, A.L.G.; Rodríguez de Sensale, G. *Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade*. Ambiente Construido, Porto Alegre, v.17, n.2, pp. 233-252, abr./jun. 2017.

86

Khana, M.N.N.; Jamil, M.; Karim, M.R.; Zain, M.F.M. *Strenght and durability of mortar and concrete containing rice husk ash: A review*. World Applied Sciences Journal 32 (5), pp. 752-765, 2014.

Khunthongkeaw, J.; Tangtermsirikul, S.; Leelawat, T. *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete*. Construction and Building Materials, vol. 20, 744-753, 2006.

Kim, H-S.; Lee, S-H.; Moon, H-Y. *Strenght properties and durability aspects of high strenght concrete using Korean metakaolin*. Construction and Building Materials, [s.l.], v. 21, n. 6, p. 1229-1237, jun. 2007.

Kokubu, M.; Nagataki, S. *Carbonation of Concrete with Fly Ash and Corrosion of Reinforcements in 20-Years [sic] Tests*. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114, Malhotra, V.M., Ed., 315-329, 1989.

Lee HM, Lee HS, Singh JK. *Prediction Model for the Carbonation of Post-Repair Materials in Carbonated RC Structures*. Materials (Basel). 2017 May; 10(5). doi:10.3390/ma10050492. PMID: 28772852; PMCID: PMC5459081.

Legrand, A.P. *The surface properties of silicas*. John Wiley & Sons, pp. 470, 1998.

Ludwig, U. *Durability of cement mortars and concretes*. Proceedings of 1st International Conference on Durability of Building Materials and Components, Ottawa, Canada, 269–281, 1980.

Marques, P.F.; Chastre, C.; Nunes, A. *Carbonation service life modeling of RC structures for concrete with Portland and blended cements*. Cement & Concrete Composites 37, 171-184, 2013.

Mehta, P.K. *Siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom*, United States Patent 4,105,459, 1978.

Miller, S.A.; Cunningham, P.R.; Harvey, J.T. *Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability*. Resources, Conservation & Recycling 146 (2019), 416-430, 2019.

Moreno, E.I.; Domínguez, G.G.; Cob, E.J.; Duarte, F. *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración*. Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 8, N° 2, 117-130, 2004.

Mun, K.J.; So, S.Y.; Soh, Y.S. *The effect of slaked lime, anhydrous gypsum and limestone powder on properties of blast furnace slag cement mortar and concrete*. Construction and Building Materials 21, 1576-1582, 2007.

Nascimento, W.N.; Silva, V.S.; Ribeiro, F.H.M; Teixeira, L.M. *Adição de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto sob o aspecto da durabilidade*. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, Anais, 2002.

Neville; A.M. *Properties of concrete*. Pearson Education Limited. Harlow, Reino Unido, 2012.

Osborne, G. *Carbonation and Permeability of Blast Furnace Slag Cement Concretes from Field Structures*. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACISP-114, pp. 1209-1237, 1989.

Parrot, L.J. *A review of carbonation in reinforced concrete*. Cement and concrete Association report, 1987.

Peng, G.F.; Yang, J. *Influence of Rice Husk Ash on the properties of Concrete: a Review*. International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD), 2016.

Pipilikaki, P.; Katsioti, M. *Study of the hydration process of quaternary blended cements and durability of the produced mortars and concretes*. Construction and Building Materials 23, 2246-2250, 2009.

Phung, Q.T.; Maes, N.; Jacques, D.; Bruneel, E.; Van Drissche, I.; Ye, G.; De Schutter, G. *Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions*. Construction and Building Materials 82 (2015); 376-390.

Raposeiro da Silva, P.; de Brito, J. *Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary of fly ash and limestone filler*. Materials and Structures 49: 2749-2766, 2016.

Rodríguez de Sensale, G.; Romay, C.; Sabalsagaray, B.S.; Costa, F.; Gutiérrez, S.; Benítez, A.; Dalchiale, E. *Valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz*. INIA, Serie FPTA-INIA N° 45, febrero de 2013.

Rodríguez de Sensale G. *Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials*, 2010.

Rodríguez de Sensale, G.; Rodríguez Viacava, I. *A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone*, 2018.

Shao, Y.; Rostami, V.; He, Z.; Boyd, A.J. *Accelerated Carbonation of Portland Limestone Cement*. Journal of Materials in Civil Engineering 26 (1); 117-124, enero de 2014.

Siddique, R. *Waste Materials and By-Products in Concrete*, 2008.

Skjolsvold, O. *Carbonation Depths of Concrete with and without Condensed Silica Fume. Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-91, Malhotra, V.M., Ed., pp. 1031-1048, 1986.

Soares, L.W.O.; Braga, R.M.; Freitas, J.C.O.; Ventura, R.A.; Pereira, D.S.S.; Melo, D.M.A. *The effect of rice husk ash as pozzolan in addition to cement Portland class G for oil well cementing*. J. Petrol. Sci. Eng. 131; 80-85; 2015.

Thomas, B.S. *Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 3913–3923; 2018.

Tsivilis, S.; Batis, G.; Chaniotakis, E.; Grigoriadis, Gr.; Theodossis, D. *Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar*. Cements & Concrete Research 30, 1679-1683, 2000.

UNE-EN 13295:2005. *Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la resistencia a la carbonatación*. Asociación Española de Normalización y Certificación. España, 2005.

Vaghetti, M.A. *Estudo da corrosão de aço, inducida por carbonatação, em concretos com adições minerais*. Tesis Doctoral, Curso de Pos-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiales, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.

Van den Heede, P.; De Belie, N. *Durability based life cycle assessment of concrete with supplementary cementitious materials exposed to carbonation*. La Plata, Argentina, 2015.

Verbeck, G.J. *Carbonation of Hydrated Portland Cement*. ASTM Special Technical Publication, pp. 17-36, 1958.

Wang, X-Y. *Modeling of Hydration, Compressive Strength, and Carbonation of Portland-Limestone Cement (PLC) Concrete*. Materials (2017), 10, 115.

Wolf, J. *Influência do teor do calcário na carbonatação de argamassas de cimento branco*. Tesis Doctoral del Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.

Yu, Q.; Sawayama, K.; Sugita, S.; Shoya, M.; Isojima, Y. *The reaction between rice husk ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution and the nature of its product*. *Cements & Concrete Research* 29, pp. 37-43, 1999.

ANEXO A – RESULTADOS OBTENIDOS

Nº	Probeta	cara 1					d _{k1}	cara 2					d _{k2}	cara 3					d _{k3}	cara 4					d _{k4}	d _k	
		1	2	3	4	5		6	7	8	9	10		11	12	13	14	15		16	17	18	19	20			
1.1.A	CCA 0 / F 0	0.74	0.49	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.00	0.75	0.63	0.9	0.65	0.85	0.76	0.25	CCA 0 / F 0
1.1.B		0.69	0.86	0	0	0	0.31	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0.7	0.14	0.48	0.7	0.8	0.75	0.76	0.70	0.29	
1.2.A		0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.00	0.81	0.73	0.49	0.92	0.92	0.77	0.19	
1.2.B		0.67	0.4	0	0	0	0.21	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0.88	0.18	0.79	0.67	0.51	0.91	0.92	0.76	0.29	
1.3.A		0	0	0	0.54	0.71	0.25	0.91	0.88	0.92	0.68	0	0.68	0.43	0.49	0.5	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0.00	0.30	
1.3.B		0	0	0	0.73	0.76	0.30	0.86	0.9	0.9	0	0	0.53	0.54	0.49	0	0	0	0.21	0	0	0	0	0	0.00	0.26	
2.1.A	CCA 0 / F 0	2.78	2.83	2.84	3.77	3.74	3.19	4.61	4.06	3.88	3.8	4.37	4.14	3.52	3.27	3.57	0	0	2.07	0	0	0	0	0	0.00	2.35	CCA 0 / F 0
2.1.B		3.56	3.11	3.05	3.66	3.84	3.44	4.16	4.02	3.62	3.68	4.67	4.03	3.17	3.4	3.19	0	0	1.95	0	0	0	0	0	0.00	2.36	
2.2.A		3.22	3.95	3.83	3.9	3.58	3.70	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	2.31	2.56	0.97	4.38	3.72	3.31	3.69	3.78	3.78	2.11	
2.2.B		3.32	4.53	3.82	3.74	2.96	3.67	0	0	0	0	0	0.00	0	0	2.43	2.89	3.14	1.69	3.94	3.5	3.47	3.81	3.75	3.69	2.27	
2.3.A		3.57	4.21	3.84	4.02	4.04	3.94	4.93	4.11	3.96	3.74	3.12	3.97	2.82	3.48	2.8	3.68	3.84	3.32	0	0	0	0	2.06	0.41	2.91	
2.3.B		2.98	4.28	2.4	3.89	4	3.51	5.28	4	3.22	3.65	2.81	3.79	2.58	3.34	2.89	3.43	3.52	3.15	0	0	0	0	0	0.00	2.61	
3.1.A	CCA 0 / F 5	2.32	2.75	3.39	4.22	4.89	3.51	4.3	4.32	4.32	3.13	3.43	3.90	4.04	4.03	4.12	2.33	0	2.90	0	0	3.48	1.54	0	1.00	2.83	CCA 0 / F 5
3.1.B		2.67	3.08	3.7	4.95	5.76	4.03	4.09	4.08	3.82	3.4	3.96	3.87	4.35	4.1	4.39	2.66	0	3.10	0	0	1.28	1.56	0	0.57	2.89	
3.2.A		4.75	4.74	5.5	3.59	3.78	4.47	0	0	0	0	0	0.00	3.22	3.23	3.18	3.45	3.62	3.34	4.29	4.99	6.97	5.28	5.63	5.43	3.31	
3.2.B		4.77	4.85	5.31	2.96	3.75	4.33	2.39	0	0	0	0	0.48	4.15	3.09	3.59	3.77	3.87	3.69	4.38	4.95	6.79	4.77	4.77	5.13	3.41	
3.3.A		3.53	3.55	3.64	4.25	5.13	4.02	4.9	4.91	4.83	3.97	4.11	4.54	2.77	3.07	3.07	3.08	2.7	2.94	0	0	0	2.66	0	0.53	3.01	
3.3.B		3.3	3.66	3.66	4.01	5.15	3.96	4.85	4.86	4.19	4.01	4.01	4.38	3.44	3	3.13	2.89	2.82	3.06	0	0	0	2.52	0	0.50	2.98	
4.1.A	CCA 0 / F 10	4.15	4.51	5	6.24	6.75	5.33	4.94	5.04	4.53	5.04	5.58	5.03	6.57	6.1	4.67	4.28	3.49	5.02	0	0	0	0	0	0.00	3.84	CCA 0 / F 10
4.1.B		3.96	4.37	5.04	6.43	6.93	5.35	5.61	5.4	4.6	4.84	5.91	5.27	6.53	5.27	4.86	4.12	3.84	4.92	0	0	0	0	0	0.00	3.89	
4.2.A		4.45	4.67	4.87	5.88	infinito	4.97	7.65	7.09	6.14	6.11	6.33	6.66	4.16	4.2	4.46	4.06	4.86	4.35	0	4.39	2.44	0	3.47	2.06	4.51	
4.2.B		4.49	4.74	6.08	6.26	infinito	5.39	7.39	6.6	6.09	5.5	6.45	6.41	4.83	4.72	4.6	4.46	4.22	4.57	0	4.77	2.45	0	3.52	2.15	4.63	
4.3.A		8.34	7.51	5.89	5.31	4.6	6.33	2.28	0	0	0	0	0.46	3.24	4.58	4.36	4.9	5.38	4.49	5.84	5.27	5.65	5.4	8.16	6.06	4.34	
4.3.B		8.49	7.36	5.99	5.46	5.04	6.47	0	0	0	0	0	0.00	3.9	4.4	4.4	4.93	5.73	4.67	5.69	5.23	5.81	5.57	infinito	5.58	4.18	
5.1.A	CCA 0 / F 15	4.1	4.39	5.81	6.21	10.34	6.17	10.37	6.17	5.52	6.37	6.6	7.01	5.65	5.57	5.55	4.73	4.37	5.17	0.5	1.91	1.62	1.85	1.85	1.55	4.97	CCA 0 / F 15
5.1.B		4.7	4.59	5.5	6.16	11.91	6.57	10.45	6.84	5.6	5.93	7.8	7.32	5.52	5.3	4.96	4.55	4.32	4.93	1.77	2.45	0	1.95	1.76	1.59	5.10	
5.2.A		5.92	5.41	4.29	5.76	8.79	6.03	8.23	6.36	6.19	5.89	6.63	6.66	6.63	4.64	5.34	5.33	4.96	5.38	4.25	2.97	4.4	3.17	1.86	3.33	5.35	
5.2.B		6.14	5.41	4.17	5.97	9.46	6.23	7.95	6.82	6.97	6.9	7.84	7.30	6.3	5	6.12	5.91	5.05	5.68	3.8	2.87	4.33	3.16	1.73	3.18	5.60	
5.3.A		7.85	6.18	5.97	6.01	5.83	6.37	2.03	3.3	3.3	3.58	1.86	2.81	4.84	6.81	6.38	4.7	7.11	5.97	7.49	5.8	5.35	5.87	9.52	6.81	5.49	
5.3.B		7.31	5.78	6.14	6.38	6.58	6.44	2.14	3.62	3.04	4.06	1.37	2.85	5.08	7.11	6.83	4.94	infinito	5.99	7.04	5.96	5.67	5.61	infinito	6.07	5.34	
6.1.A	CCA 0 / F 20	infinito	8.04	6.54	7.17	7.01	7.19	7	4.02	3.49	4.37	5.26	4.83	5.64	8.06	7.29	7.62	infinito	7.15	15.25	8.03	6.9	8.38	15.27	10.77	7.48	CCA 0 / F 20
6.1.B		11.3	8.04	6.85	7.1	7.91	8.24	6.39	4.51	3.87	4.21	4.87	4.77	5.81	8.45	7.46	8.09	infinito	7.45	13.54	8.77	7.22	8.92	infinito	9.61	7.52	
6.2.A		infinito	8.32	8.18	8.18	15.02	9.93	infinito	8.63	6.4	5.48	5.18	6.42	2.55	2.23	2.21	2.21	2.17	2.27	5.03	5.61	5.62	6.32	infinito	5.65	6.07	
6.2.B		12.12	7.95	8.84	8.85	infinito	9.44	infinito	8.12	6.86	6.08	6	6.77	2.45	2.42	2.39	2.12	2.11	2.30	5.17	6.54	6.19	7.17	infinito	6.27	6.19	
6.3.A		14.26	9.14	7.95	9.16	16.94	11.49	infinito	8.53	6.62	6.67	6.12	6.99	2.59	3.41	3.81	4.26	3.62	3.54	7.12	7.07	6.88	7.67	infinito	7.19	7.30	
6.3.B		13.98	9.14	8.03	9.23	17.12	11.50	infinito	8.36	6.9	6.89	5.37	6.88	2.79	2.96	3.25	4.87	2.92	3.36	7.77	7.12	6.9	8.11	infinito	7.48	7.30	
7.1.A	CCA 0 / F 25	8.5	8.39	7.89	7.72	infinito	8.13	infinito	7.92	8.12	8.53	infinito	8.19	infinito	8.24	7.17	6.5	8.54	7.61	infinito	5.64	5.89	5.92	7.72	6.29	7.56	CCA 0 / F 25
7.1.B		8.32	7.99	8.1	8.29	infinito	8.18	infinito	7.51	7.55	8.77	9.82	8.41	infinito	7.2	6.91	6.91	8.12	7.29	infinito	5.63	5.64	5.74	infinito	5.67	7.39	
7.2.A		9.26	7.72	7.73	7.96	infinito	8.17	infinito	8.4	7.42	7.65	infinito	7.82	infinito	7.05	7.06	6.96	7.4	7.12	infinito	4.91	5.22	5.23	infinito	5.12	7.06	
7.2.B		8.88	7.97	7.91	8.04	infinito	8.20	infinito	9.05	7.89	8.87	infinito	8.60	infinito	8.06	7.97	7.72	9.41	8.29	infinito	4.84	5.19	5.19	infinito	5.07	7.54	
7.3.A		9.26	8.42	7.06	7.54	infinito	8.07	infinito	8.25	8.26	8.89	12.37	9.44	infinito	6.54	6.76	7.1	8.72	7.28	10.26	6.44	6.45	6.45	infinito	7.40	8.05	
7.3.B		9.38	8.3	6.67	7.56	infinito	7.98	9.92	8.43	8.42	8.58	11.83	9.44	infinito	6.84	6.5	6.77	8.37	7.12	10.75	6.27	6.77	6.17	infinito	7.49	8.01	
8.1.A	CCA 0 / F 30	10.15	8.19	8.98	10	infinito	9.33	infinito	10.4	10.4	10.05	infinito	10.28	infinito	9.58	9	9.36	9.74	9.42	infinito	7.01	6.31	6.94	infinito	6.75	8.95	CCA 0 / F 30
8.1.B		9.44	8.41	8.99	10.3	infinito	9.29	infinito	10.18	10.17	10.35	infinito	10.23	infinito	9.21	8.74	9.12	10.13	9.30	infinito	6.98	6.08	6.61	infinito	6.56	8.84	
8.2.A		11.06	9.4	9.39	11.86	infinito	10.43	infinito	11.64	10.47	11.12	infinito	11.08	infinito	9.97	8.49	8.71	10.9	9.52	infinito	6.55	5.64	6.74	infinito	6.31	9.33	
8.2.B		10.45	9.61	9.49	10.75	infinito	10.08	infinito	10.77	9.56	10.49	infinito	10.27	infinito	9.65	8.95	8.76	infinito	9.12	infinito	6.5	5.32	6.18	infinito	6.00	8.87	
8.3.A		infinito	9.37	9.89	11.9	infinito	10.39	infinito	13.1	12.04	11.6	infinito	12.25	infinito	10.27	9.12	8.79	9.64	9.46	infinito	6.31	5.83	7.31	infinito	6.48	9.64	
8.3.B		11.83	9.2	9.63	infinito	infinito	10.22	infinito	12.68	11.72	11.2	infinito	11.87	infinito	10.14	9.27	9.16	9.53	9.53	infinito	6.58	6.16	7.76	infinito	6.83	9.61	
9.1.A	CCA A 5 / F 0	4.21	4.12	4.12	5.17	6.48	4.82	4.2	3.99	4.64	4.21	4.95	4.40	4.61	4.02	3.68	3.68	3.66	3.93	0	0	0	2.26	3.26	1.10	3.56	CCA A 5 / F 0
9.1.B		4.83	4.42	4.68	5.04	6.9	5.17	4.48	4.19	4.49	4.79	4.72	4.53	3.72	3.78	3.39	3.89	3.39	3.63	0	0						

11.1.A	CCA A 15 / F 0	5.57	5.53	4.38	6.09	7.15	5.74	5.81	6.84	6.95	7.8	8.83	7.25	infinito	5.45	5.24	5.55	4.65	5.22	3.28	3.22	3.68	4.23	4.78	3.84	5.51	5.24	CCA A 15 / F 0
11.1.B		5.44	5.39	4.62	5.91	7.17	5.71	5.64	6.59	6.76	7.53	9.03	7.11	infinito	5.35	5.22	5.74	4.34	5.16	3.3	3.36	3.74	4.08	4.69	3.83	5.45		
11.2.A		4.76	5.44	4.89	5.25	8.85	5.84	7.62	6.95	5.93	5.7	7.48	6.74	7.65	5.56	5.55	3.99	3.59	5.27	4.29	4	3.99	3.61	3.58	3.89	5.43		
11.2.B		4.6	5.59	5.08	5.32	8.97	5.91	7.84	6.98	5.82	5.51	7.94	6.82	7.4	5.22	5.63	4.02	3.64	5.18	4.66	4.33	3.82	3.66	3.36	3.97	5.47		
11.3.A		5.88	5.75	5.5	5.94	6.78	5.97	5.73	5.48	4.93	4.92	5.32	5.28	5.04	4.68	4.23	3.85	4.16	4.39	3.72	3.72	3.24	3.31	3.98	3.59	4.81		
11.3.B	5.9	5.49	5.27	6.07	infinito	5.68	5.47	5.37	5.31	4.86	5.69	5.34	5.49	4.61	4.07	3.92	4.19	4.46	3.37	3.42	3.42	3.7	3.66	3.51	4.75			
12.1.A	CCA A 20 / F 0	7.55	5.51	5.84	7.4	9.42	7.14	infinito	6.96	6.77	6.51	6.76	6.75	6.7	6.13	5.64	5.27	5.83	5.91	5.26	4.79	4.6	4.55	5.04	4.85	6.16	5.89	CCA A 20 / F 0
12.1.B		7.7	5.27	5.64	7.08	infinito	6.42	infinito	7.26	6.83	6.57	6.75	6.85	6.63	5.78	5.28	5.04	5.74	5.69	5.25	4.87	4.53	4.3	5.1	4.81	5.94		
12.2.A		6.35	6.08	5.96	6.52	infinito	6.23	infinito	7.86	7.37	7.1	6.55	7.22	6.41	5.5	5.45	5.39	5.55	5.66	4.69	4.23	4.17	4.16	4.53	4.36	5.87		
12.2.B		6.58	5.95	6.19	6.47	infinito	6.30	8.95	7.78	7.77	7.25	6.74	7.70	6.72	5.48	5.38	5.28	5.86	5.74	4.38	4.43	4.4	4.19	4.59	4.40	6.03		
12.3.A		5.59	5.61	5.17	7.73	infinito	6.03	8.84	6.8	6.41	6.14	6.89	7.02	6.39	4.92	4.62	5.16	5.88	5.39	4.78	3.68	3.86	4.08	4.36	4.15	5.65		
12.3.B	5.24	5.37	5.32	7.7	infinito	5.91	8.46	7.07	6.37	6.07	6.72	6.94	6.79	4.8	4.73	5.43	6.03	5.56	4.74	3.75	3.74	4.03	4.82	4.22	5.65			
13.1.A	CCA A 25 / F 0	5.05	5.42	6.48	6.48	infinito	5.86	8.1	6.07	6.93	6.91	8.81	7.36	infinito	7.04	6.89	6.08	5.84	6.46	5.24	4.12	4.73	5.36	5.35	4.96	6.16	5.69	CCA A 25 / F 0
13.1.B		5.19	5.37	6.28	6.37	7.4	6.12	7.92	6.24	6.68	6.66	8.07	7.11	infinito	7.03	6.77	5.82	5.87	6.37	5.19	4.09	4.62	5.03	5.45	4.88	6.12		
13.2.A		5.32	5.32	5.86	5.87	6.29	5.73	6.14	5.96	6	6.16	6.62	6.18	6.45	5.27	5.05	5.62	5.06	5.49	3.97	3.87	4.02	3.76	4.89	4.10	5.38		
13.2.B		5.12	5.01	5.53	6.08	6.95	5.74	6.69	6.27	6.11	5.91	7.17	6.43	6.22	5.67	5.19	5.4	5.23	5.54	4.23	3.92	4.37	4.09	4.95	4.31	5.51		
13.3.A		5.85	6.04	5.39	5.65	7.54	6.09	7.98	6.32	5.89	6.4	7.4	6.80	6.92	5.61	5.26	5.25	5.21	5.65	3.2	3.33	3.62	3.79	3.89	3.57	5.53		
13.3.B	5.79	6.29	5.48	5.76	7.61	6.19	7.91	6.24	5.8	6.49	7.5	6.79	6.97	5.59	5.1	5.32	5.02	5.60	2.89	3.12	3.4	3.28	4.01	3.34	5.48			
14.1.A	CCA A 30 / F 0	6.49	6.53	6.54	7.23	infinito	6.70	infinito	7.91	7.86	8.66	8.56	8.25	infinito	6.89	6.11	5.84	6	6.21	5.47	5.39	5.61	5.46	6.92	5.77	6.73	6.89	CCA A 30 / F 0
14.1.B		6.71	6.71	6.73	7.46	infinito	6.90	infinito	7.9	7.84	8.56	8.96	8.32	infinito	6.94	6.31	6.04	5.99	6.32	5.28	5.15	5.89	5.5	7.1	5.78	6.83		
14.2.A		7.33	5.6	5.54	6.05	infinito	6.13	7.18	6.43	6.63	7.45	8.44	7.23	infinito	7.53	7.5	7.96	8.34	7.83	infinito	6.06	5.94	5.89	7.13	6.26	6.86		
14.2.B		7.73	5.97	5.51	6.25	infinito	6.37	7.18	6.18	6.3	7.55	8.26	7.09	infinito	7.71	7.17	8.05	8.58	7.88	infinito	5.93	5.9	5.95	7.29	6.27	6.90		
14.3.A		7.48	7.08	7.23	7.23	infinito	7.26	infinito	8	8.41	8.42	infinito	8.28	infinito	7.22	6.01	6.11	6.57	6.48	5.71	5.32	5.24	5.28	7.5	5.81	6.95		
14.3.B	7.57	7.56	7.49	7.24	infinito	7.47	infinito	8.21	8.36	8.62	infinito	8.40	infinito	7.38	6.28	5.77	6.2	6.41	5.88	5.26	5.13	5.7	7.73	5.94	7.05			
15.1.A	CCA A 5 / F 5	5.13	5.12	5.21	5.18	5.79	5.29	4.08	4.09	4.16	2.81	2.53	3.53	4.01	4.9	3.28	6.17	7.26	5.12	5.55	5.19	5.15	5.76	5.83	5.50	4.86	5.06	CCA A 5 / F 5
15.1.B		5.44	5.14	5.47	5.54	5.91	5.50	4.16	4.21	4.35	2.54	2.44	3.54	3.93	4.55	3.31	6.38	7.32	5.10	5.31	5.03	5.04	5.79	5.97	5.43	4.89		
15.2.A		6.63	5.69	5.58	5.02	4.94	5.57	4.51	3.3	3.34	2.47	3.3	3.38	5.07	5.47	5.32	4.96	7.65	5.69	7.55	5.26	5.94	5.03	6.32	6.02	5.17		
15.2.B		6.6	5.66	5.63	4.96	4.96	5.56	4.81	3.21	3.23	2.5	3.31	3.41	5.14	5.79	5.23	4.96	7.2	5.66	7.56	5.31	5.74	5.33	6.51	6.09	5.18		
15.3.A		7.67	5.64	5.64	5.5	5.48	5.99	3.99	3.79	2.96	3.38	3.12	3.45	4.18	4.31	5.03	4.59	infinito	4.53	6.43	6.19	6.08	6.1	7.86	6.53	5.12		
15.3.B	7.46	5.68	5.71	5.65	5.71	6.04	3.91	3.62	2.8	3.43	3.11	3.37	4.27	4.68	4.96	4.33	infinito	4.56	6.34	5.98	6	6.09	7.95	6.47	5.11			
16.1.A	CCA A 10 / F 5	5.51	5.52	5.96	5.98	7.93	6.18	7.35	6.68	5.65	5.28	7.41	6.47	8.42	6.3	4.87	4.75	4.52	5.77	2.68	4.57	4.01	3.77	4.51	3.91	5.58	5.31	CCA A 10 / F 5
16.1.B		5.29	5.55	6.07	5.99	8.08	6.20	7.66	6.81	5.71	5.48	6.92	6.52	8.51	6.23	4.63	4.76	4.57	5.74	2.96	4.4	4.23	3.49	4.81	3.98	5.61		
16.2.A		5.23	5.2	5.19	5.19	6.04	5.37	7.06	6.59	5.69	6.61	6.07	6.40	5.41	4.56	4.63	4.54	4.44	4.72	4.37	4.26	4.04	4.03	4.15	4.17	5.17		
16.2.B		5.48	5.07	5.12	5.17	6.19	5.41	6.89	6.55	5.85	6.54	6.18	6.40	5.23	4.34	4.57	4.57	4.29	4.60	4.3	4.29	4.24	4.2	4.2	4.25	5.16		
16.3.A		4.83	6.01	5.57	5.15	5.73	5.46	6.91	7.76	7.31	5.45	6.72	6.83	5.62	5.21	4.73	4.63	4.23	4.88	3.29	3.83	3.45	3.57	4.74	3.78	5.24		
16.3.B	4.98	6.07	5.75	5.17	5.97	5.59	6.84	7.71	7.22	5.47	6.77	6.80	5.63	5.62	5.05	4.84	4.2	5.07	0	3.85	3.42	3.23	4.58	3.02	5.12			
17.1.A	CCA A 15 / F 5	8.6	5.78	5.76	6.75	7.47	6.87	6.34	3.48	3.33	3.59	4.33	4.21	4.36	4.78	4.92	5.34	7.36	5.35	6.35	6.28	6.49	6.5	8.26	6.78	5.80	5.43	CCA A 15 / F 5
17.1.B		8.65	5.73	5.88	6.8	7.65	6.94	6.35	3.69	3.24	3.61	4.51	4.28	4.23	4.67	4.96	5.57	7.49	5.38	6.17	6.28	6.47	6.44	8.12	6.70	5.83		
17.2.A		7.05	5.86	5.71	5.45	5.76	5.97	4.03	3.45	3.96	3.56	3.56	3.71	4.26	4.58	4.87	5.07	5.48	4.85	7.83	7.04	8.08	7.88	7.36	7.64	5.54		
17.2.B		7.35	6.03	5.69	5.48	5.72	6.05	4.18	3.21	3.72	3.4	3.4	3.58	4	4.6	4.94	5.22	5.55	4.86	7.55	6.93	7.79	7.7	7.42	7.48	5.49		
17.3.A		5.69	4.99	4.81	5.15	5.9	5.31	3.57	3.56	3.01	3.04	3.14	3.26	3.6	4.1	5.87	5.84	7.28	5.34	5.98	5.99	5.86	5.84	6.45	6.02	4.98		
17.3.B	5.89	4.96	4.8	5.44	5.75	5.37	2.83	2.81	3.07	2.93	2.98	2.92	3.65	4.17	5.54	6.09	7.14	5.32	6.07	6.09	5.82	6	6.39	6.07	4.92			
18.1.A	CCA A 20 / F 5	infinito	6.48	6.48	6.08	6.18	6.31	6.16	5.36	5.29	5.35	5.77	5.59	5.79	5.78	5.56	5.66	7.33	6.02	8.28	6.69	6.7	6.78	8.59	7.41	6.33	6.36	CCA A 20 / F 5
18.1.B		infinito	6.6	6.4	6.12	6.21	6.33	6.2	5.39	5.37	5.05	5.69	5.54	5.68	5.6	5.61	5.55	7.12	5.91	8.19	6.79	6.8	6.76	8.54	7.42	6.30		
18.2.A		infinito	7.45	6.13	6.42	6.92	6.73	6.56	5.38	4.93	4.63	5.06	5.31	6.37	5.25	5.8	6.47	6.4	6.06	7.1	7.01	7.23	7.91	9.43	7.74	6.46		
18.2.B		infinito	7.78	6.05	6.3	6.75	6.72	6.32	5.25	4.97	4.46	4.92	5.18	6.58	5.37	5.81	6.29	6.5	6.11	7.21	7.19	7.15	7.85	9.36	7.75	6.44		
18.3.A		6.77	6.98	7.25	9.08	9.3	7.88	infinito	6.84	6.7	6.69	7.03	6.82	7.01	5.49	5.47	5.46	4.92	5.67	4.36	4.42	4.91	5.21	5.58	4.90	6.31		
18.3.B	6.95	6.95	7	9.15	9.3	7.87	infinito	6.78	6.81	6.7	7.02	6.83	7.06	5.68	5.56	5.49	5.06	5.77	4.34	4.37	4.62	4.97	5.62	4.78	6.31			
19.1.A	CCA A 25 / F 5	8.55	6.02	6.45	6.81	7.59	7.08	6.67	4.87	4.87	4.48	5.26	5.23	5.87	5.8	5.81	5.91	6.81	6.04	6.99	6.98	7.36	7.9	8.38	7.52	6.47	6.45	CCA A 25 / F 5
19.1.B		8.34	6.1	6.48	6.89	7.51	7.06	6.49	4.99	4.8	4.55	5.02	5.17	5.84	5.76	5.83	5.84	6.68	5.99	6.91	7.04	7.05	7.74	8.47	7.44	6.42		
19.2.A		8.24	7.07	6.92	6.58	6.71	7.10	6.32	5.3	5.44																		

22.1.A	CCA G 10 / F 0	5.85	4.84	5.15	5.65	15.35	7.37	6.48	6.45	4.09	3.76	6.7	5.50	5.89	5	4.01	3.33	2.71	4.19	2.6	2.41	2.7	2.69	4.23	2.93	4.99	4.87	CCA G 10 / F 0
22.1.B		6.12	4.76	5.33	5.8	15.99	7.60	6.6	6.64	4.02	3.89	6.89	5.61	6.08	5.07	4	3.22	2.99	4.27	2.72	2.44	2.97	2.85	4.53	3.10	5.15		
22.2.A		4.51	4.44	4.26	4.47	9.09	5.35	9.26	5.07	5.65	5.37	7.28	6.53	5.72	4.37	3.8	4.42	4.5	4.56	2.52	2.08	2.17	2.26	2.23	2.25	4.67		
22.2.B		4.45	4.67	4.36	4.59	9.31	5.48	9.65	5.19	5.79	5.5	7.48	6.72	5.63	4.45	3.63	4.6	4.53	4.57	2.39	2.02	2.15	2.24	2.2	2.20	4.74		
22.3.A		9.85	5.31	4.95	4.72	4.53	5.87	2.78	2.78	3.87	2.32	2	2.75	3.04	4.34	4.34	3.75	6.45	4.38	7.05	5.24	6.24	5	8.28	6.36	4.84		
22.3.B	9.05	5.18	4.94	4.8	4.4	5.67	2.61	2.61	3.76	2.38	2.23	2.72	3.13	4.53	4.51	3.84	6.59	4.52	6.9	5.11	6.36	5	7.97	6.27	4.80			
23.1.A	CCA G 15 / F 0	4.03	4.04	4.72	4.69	7.5	5.00	8.05	6.1	5.36	5.37	6.35	6.25	6.15	5.39	4.01	4	4.01	4.71	3.35	3.64	3.18	3.19	3.43	3.36	4.83	4.82	CCA G 15 / F 0
23.1.B		4.23	3.93	4.84	4.51	7.5	5.00	7.45	6.11	5.35	5.35	6.09	6.07	6.36	5.7	4.26	4.1	4.07	4.90	3.42	3.73	3.3	2.76	3.44	3.33	4.83		
23.2.A		4.32	4.33	5.69	4.75	7.59	5.34	5.61	5.8	5.8	5.63	7.48	6.06	4.12	4.42	4.26	4.43	4.85	4.42	3.91	3.01	2.87	2.64	2.62	3.01	4.71		
23.2.B		4.56	4.64	5.58	4.82	7.61	5.44	5.53	5.75	5.96	5.49	7.67	6.08	4.01	4.32	4.4	4.65	4.89	4.45	3.89	3.11	3	2.36	2.66	3.00	4.75		
23.3.A		5.16	4.87	4.92	5.15	4.74	4.97	4.38	5.31	3.57	3.91	3.9	4.21	4.11	4.12	4.03	4.23	5.83	4.46	6.38	5.92	5.56	5.12	6.9	5.98	4.91		
23.3.B	5.1	4.83	4.84	4.99	4.97	4.95	4.39	5.42	3.62	4.01	4	4.29	4	3.99	4.11	4.12	5.61	4.37	6.19	5.81	5.59	5.18	7.04	5.96	4.89			
24.1.A	CCA G 20 / F 0	5.18	5.39	5.53	5.96	8.14	6.04	6.69	5.8	5.75	5.72	6.78	6.15	5.85	5.12	4.94	5.12	5.11	5.23	5.12	4.53	4.04	4.06	4.1	4.37	5.45	5.34	CCA G 20 / F 0
24.1.B		5.22	5.55	5.52	6.03	8.08	6.08	6.49	5.75	5.76	5.75	6.61	6.07	5.94	5.24	4.85	5.05	5.04	5.22	5.05	4.56	4.16	4.15	4.13	4.41	5.45		
24.2.A		4.87	4.6	4.81	5.84	6.6	5.34	6.81	5.8	5.76	5.8	6.09	6.05	6.33	6.14	5.03	4.88	4.6	5.40	3.96	3.97	4.06	4.1	4.1	4.04	5.21		
24.2.B		4.74	4.59	4.92	5.76	6.59	5.32	6.91	5.85	5.86	5.85	6.06	6.11	6.44	6.29	5.16	4.92	4.75	5.51	3.89	3.81	4	3.98	4	3.94	5.22		
24.3.A		infinito	4.53	4.21	4.54	4.81	4.52	4.8	4.08	4.05	4.04	4.05	4.20	4.43	4.86	4.77	4.81	7.01	5.18	7.65	6.85	6.67	6.72	10.53	7.68	5.40		
24.3.B	infinito	4.62	4.05	4.49	4.81	4.49	4.81	3.92	3.92	3.93	3.94	4.10	4.3	4.61	4.89	4.92	6.99	5.14	7.56	6.78	6.56	6.52	10.48	7.58	5.33			
25.1.A	CCA G 25 / F 0	8.55	5.28	6.58	6.39	6.45	6.65	8.38	8.36	6.18	6.36	6.55	7.17	5.85	5.72	5.1	5.08	6.56	5.66	6.26	5.05	5.06	5.04	8.29	5.94	6.35	6.01	CCA G 25 / F 0
25.1.B		8.54	5.4	6.43	6.29	6.66	6.66	8.37	8.36	6.21	6.48	6.67	7.22	5.9	5.68	5.27	4.97	6.42	5.65	6.34	4.99	4.98	4.98	8.13	5.88	6.35		
25.2.A		8.34	5.47	5.74	5.86	5.87	6.26	4.06	4.77	4.66	4.67	5.21	4.67	5.27	5.21	5.2	5.21	5.28	5.23	5.82	5.86	6.22	5.96	7.11	6.19	5.59		
25.2.B		8.3	5.3	5.49	5.66	5.82	6.11	3.99	4.51	4.53	4.66	5.54	4.65	5.33	5.32	5.31	5	5.51	5.29	5.87	5.97	6.46	5.96	7.03	6.26	5.58		
25.3.A		7.85	6.69	6.49	6.45	6.48	6.79	5.22	5.47	5.46	5.8	6.02	5.59	5.81	5.3	5.24	6.08	7.22	5.93	5.74	6.1	6.13	6.14	6.59	6.14	6.11		
25.3.B	7.91	6.67	6.5	6.4	6.54	6.80	5.16	5.5	5.35	5.75	6.05	5.56	5.72	5.55	5.16	6.02	6.98	5.89	5.24	6	6.21	6.16	6.4	6.00	6.06			
26.1.A	CCA G 30 / F 0	infinito	5.53	5.12	5.35	6.53	5.63	5.3	5.04	5.03	5.03	7.41	5.56	7.02	5.7	5.78	6.29	infinito	6.20	8.47	8.02	7.59	7.12	9.3	8.10	6.37	6.61	CCA G 30 / F 0
26.1.B		infinito	5.62	5.1	5.29	6.52	5.63	5.46	5.18	5.14	5.06	7.35	5.64	7.05	5.8	5.8	6.19	infinito	6.21	8.58	8.04	7.39	7.14	9.25	8.08	6.39		
26.2.A		6.47	5.74	5.46	6.51	infinito	6.05	7.22	7.09	7.55	6.45	7.65	7.19	7.78	6.34	5.48	5.39	5.97	6.19	5	4.64	4.67	6.11	6.6	5.40	6.21		
26.2.B		6.57	5.75	5.65	6.61	8.81	6.68	8.31	7.83	7.83	6.23	7.34	7.51	7.81	6.35	5.62	5.49	5.78	6.21	4.95	4.55	4.59	6.01	6.62	5.34	6.44		
26.3.A		7.26	6.83	5.96	5.51	8.03	6.72	6.89	6.68	6.14	7.76	infinito	6.87	10.55	7.9	8.52	7.39	8.54	8.58	8.41	5.95	5.93	6.67	6.59	6.71	7.22		
26.3.B	7.34	6.97	6.12	5.46	7.99	6.78	6.77	6.52	6.2	7.55	infinito	6.76	infinito	7.78	8.51	7.28	8.46	8.01	8.28	5.93	5.91	6.77	6.61	6.70	7.06			
27.1.A	CCA G 5 / F 5	5.34	5.61	5.51	5.87	7.45	5.96	6.49	5.78	5.45	5.31	6.51	5.91	5.79	6.01	6.01	4.72	4.08	5.32	3.43	3.09	4.07	4.07	3.11	3.55	5.19	5.18	CCA G 5 / F 5
27.1.B		5.26	5.75	5.36	5.9	7.33	5.92	6.6	5.85	5.5	5.47	6.5	5.98	5.9	6.09	6.08	4.85	4.19	5.42	3.4	3.18	4.13	4.18	3.06	3.59	5.23		
27.2.A		3.51	3.59	3.61	3.6	3.99	3.66	5.06	5.05	4.96	4.89	6.72	5.34	5.97	6.76	6.74	5.95	7.37	6.56	5.44	5.46	5.19	5.22	5.61	5.38	5.23		
27.2.B		3.59	3.51	3.74	3.61	3.91	3.67	5.05	5.05	5.04	5.01	6.61	5.35	6.03	6.82	6.81	5.8	7.27	6.55	5.41	5.52	5.1	5.38	5.76	5.43	5.25		
27.3.A		5.19	5.17	5.18	5.29	7.11	5.59	6.51	6.03	5.94	5.99	6.81	6.26	5.97	4.63	4.8	4.51	5.77	5.14	3.49	2.89	3.56	3.55	3.58	3.41	5.10		
27.3.B	5.26	5.02	5.13	5.25	7.14	5.56	6.6	6.06	5.89	5.89	6.86	6.26	6.03	4.56	4.85	4.41	5.69	5.11	3.46	2.98	3.69	3.59	3.59	3.46	5.10			
28.1.A	CCA G 10 / F 5	4.81	4.8	6.73	6.36	6.65	5.87	6.21	6.43	6.75	6.37	6.6	6.47	5.56	4.81	4.9	4.77	5.38	5.08	4.01	3.61	3.12	3.91	4.19	3.77	5.30	5.00	CCA G 10 / F 5
28.1.B		4.8	4.78	6.82	6.47	6.66	5.91	6.41	6.4	6.74	6.47	6.51	6.51	5.65	4.91	4.97	4.86	5.44	5.17	3.93	3.88	3.14	3.44	4.32	3.74	5.33		
28.2.A		4.7	4.69	4.68	4.98	5.08	4.83	5.38	5.4	5.43	5.38	6.5	5.62	4.92	4.44	4.98	5.05	3.84	4.65	3.5	3.99	4.47	4.25	4.3	4.10	4.80		
28.2.B		4.81	4.68	4.8	5.08	5.14	4.90	5.41	5.39	5.51	5.5	6.37	5.64	5.02	4.51	4.99	5.19	3.86	4.71	3.56	3.74	4.31	4.33	4.12	4.01	4.82		
28.3.A		3.7	3.71	3.72	4.78	5.59	4.30	6.03	6.05	5.91	5.9	5.91	5.96	5.52	5.04	5.03	4.98	5.02	5.12	4.2	4.18	4.17	4.15	3.82	4.10	4.87		
28.3.B	3.81	3.79	3.83	4.79	5.65	4.37	5.96	5.98	6.03	5.92	5.97	5.97	5.58	5.07	5.06	4.84	4.93	5.10	4.25	4.24	4.15	4.13	3.84	4.12	4.89			
29.1.A	CCA G 15 / F 5	9.51	7.42	6.58	6.67	8.46	7.73	6.42	5.96	6.9	6.86	7.19	6.67	7.28	6.63	5.92	5.81	6.03	6.33	6.04	4.18	4.32	5.35	10.75	6.13	6.71	6.26	CCA G 15 / F 5
29.1.B		9.57	7.36	6.44	6.79	8.39	7.71	6.56	6.03	6.88	6.88	7.23	6.72	7.21	6.69	5.94	5.74	5.97	6.31	6	4.01	4.24	5.18	10.89	6.06	6.70		
29.2.A		5.86	5.73	5.72	8.15	infinito	6.37	infinito	5.86	6.85	6.89	8.83	7.11	infinito	6.45	5.67	6.19	5.8	6.03	3.96	3.94	3.95	3.96	4.27	4.02	5.88		
29.2.B		5.74	5.75	5.72	8.01	infinito	6.31	infinito	5.97	6.82	6.88	8.36	7.01	infinito	6.53	5.76	6.26	5.82	6.09	3.85	3.86	3.94	3.91	4.14	3.94	5.84		
29.3.A		6.53	5.65	5.56	5.71	infinito	5.86	9.14	7.12	7.11	7.07	10.01	8.09	infinito	7.38	7.38	5.68	6.36	6.70	4.79	3.91	3.89	4.02	4.43	4.21	6.22		
29.3.B	6.47	5.79	5.79	5.82	infinito	5.97	9.11	7.11	7.16	7.17	10.03	8.12	infinito	7.25	7.36	5.71	6.33	6.66	4.78	3.95	3.88	3.91	4.36	4.18	6.23			
30.1.A	CCA G 20 / F 5	6.81	6.8	5.15	5.78	infinito	6.14	10.76	9.06	8.01	9.68	14.83	10.47	infinito	7.65	6.67	6.54	6.67	6.88	5.2	4.3	4.68	4.75	6.44	5.07	7.14	6.83	CCA G 20 / F 5
30.1.B		6.72	6.71	5.14	5.79	infinito	6.09	10.71	9.12	8.08	9.66	14.82	10.48	infinito	7.56	6.63	6.63	6.68	6.88	5.11	4.11	4.56	4.78	6.67	5.05	7.12		
30.2.A		5.69	6.43	6.47	6.39	infinito	6.25	9.4	7.																			

ANEXO B – RESULTADOS OBTENIDOS SIN DATOS ESPURIOS

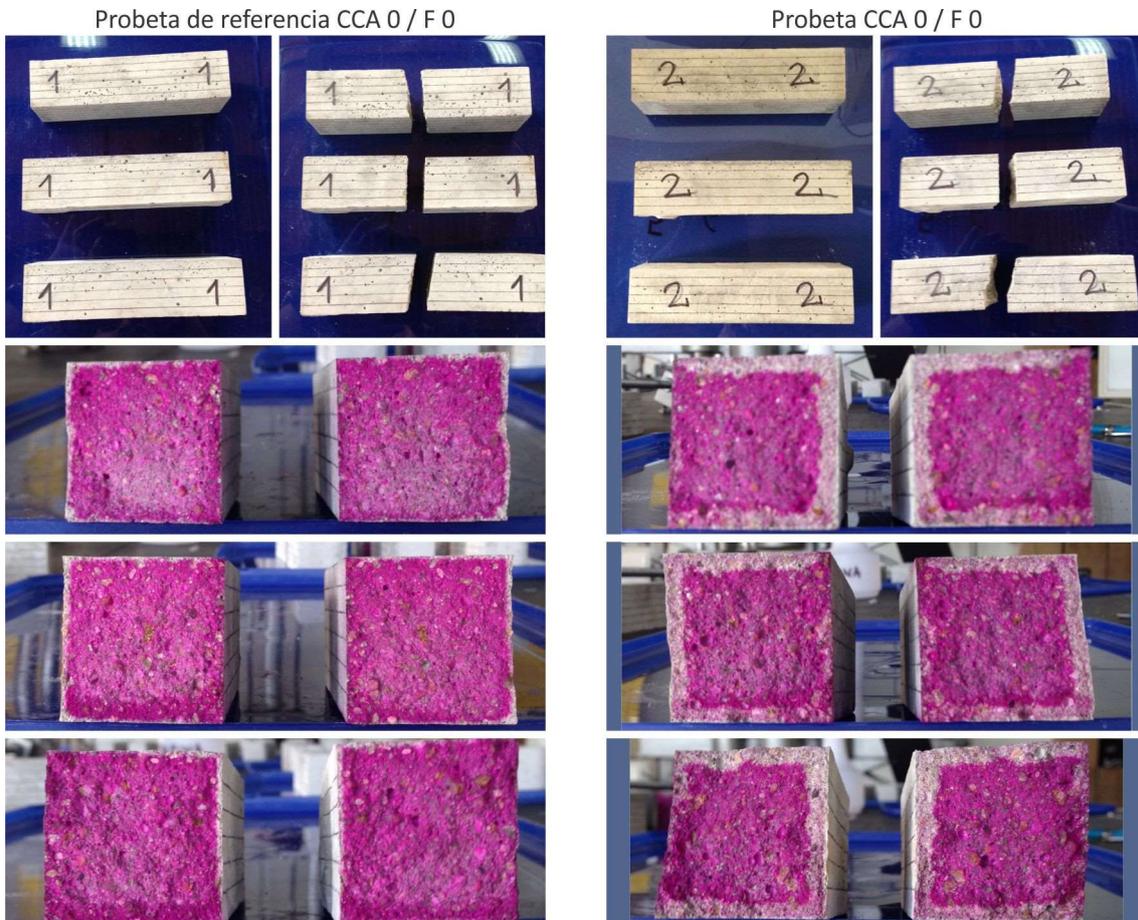
Nº	Probeta	cara 1					cara 2					cara 3					cara 4					d _k					
		1	2	3	4	5	d _{k1}	6	7	8	9	10	d _{k2}	11	12	13	14	15	d _{k3}	16	17			18	19	20	d _{k4}
1.1.A	CCA 0 / F 0	0.74	0.49	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.00	0.75	0.63	0.9	0.65	0.85	0.76	0.25	CCA 0 / F 0
1.1.B		0.69	0.86	0	0	0	0.31	0	0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0.7	0.14	0.48	0.7	0.8	0.75	0.76	0.70	0.29	
1.2.A																											
1.2.B																											
1.3.A	CCA 0 / F 0	0	0	0	0.54	0.71	0.25	0.91	0.88	0.92	0.68	0	0.68	0.43	0.49	0.5	0	0	0.28	0	0	0	0	0	0.00	0.30	CCA 0 / F 0
1.3.B		0	0	0	0.73	0.76	0.30	0.86	0.9	0.9	0	0	0.53	0.54	0.49	0	0	0	0.21	0	0	0	0	0	0.00	0.26	
2.1.A	CCA 0 / F 0	2.78	2.83	2.84	3.77	3.74	3.19	4.61	4.06	3.88	3.8	4.37	4.14	3.52	3.27	3.57	0	0	2.07							3.14	CCA 0 / F 0
2.1.B		3.56	3.11	3.05	3.66	3.84	3.44	4.16	4.02	3.62	3.68	4.67	4.03	3.17	3.4	3.19	0	0	1.95							3.14	
2.2.A		3.22	3.95	3.83	3.9	3.58	3.70							0	0	0	2.31	2.56	0.97	4.38	3.72	3.31	3.69	3.78	3.78	2.82	
2.2.B		3.32	4.53	3.82	3.74	2.96	3.67							0	0	2.43	2.89	3.14	1.69	3.94	3.5	3.47	3.81	3.75	3.69	3.02	
2.3.A	CCA 0 / F 0	3.57	4.21	3.84	4.02	4.04	3.94		4.11	3.96	3.74	3.12	3.73	2.82	3.48	2.8	3.68	3.84	3.32							3.66	CCA 0 / F 0
2.3.B		2.98	4.28		3.89	4	3.79		4	3.22	3.65	2.81	3.42	2.58	3.34	2.89	3.43	3.52	3.15							3.45	
3.1.A	CCA 0 / F 5	2.32	2.75	3.39	4.22		3.17	4.3	4.32	4.32	3.13	3.43	3.90	4.04	4.03	4.12	2.33	3.63	0	0	3.48	1.54	0	1.00	2.93	CCA 0 / F 5	
3.1.B			3.08	3.7			3.39	4.09	4.08	3.82	3.4	3.96	3.87	4.35	4.1	4.39	2.66	3.88	0	0	1.28	1.56	0	0.57	2.93		
3.2.A		4.75	4.74		3.59	3.78	4.22							3.22	3.23	3.18	3.45	3.62	3.34	4.29	4.99		5.28	5.63	5.05		4.20
3.2.B		4.77	4.85		2.96	3.75	4.08							4.15	3.09	3.59	3.77	3.87	3.69	4.38	4.95		4.77	4.77	4.72		4.16
3.3.A	CCA 0 / F 5	3.53	3.55	3.64	4.25		3.74	4.9	4.91	4.83	3.97	4.11	4.54	2.77	3.07	3.07	3.08	2.7	2.94							3.74	CCA 0 / F 5
3.3.B		3.3	3.66	3.66	4.01		3.66	4.85	4.86	4.19	4.01	4.01	4.38	3.44	3	3.13	2.89	2.82	3.06							3.70	
4.1.A	CCA 0 / F 10	4.15	4.51	5	6.24		4.98	4.94	5.04	4.53	5.04	5.58	5.03		6.1	4.67	4.28	3.49	4.64							4.88	CCA 0 / F 10
4.1.B		3.96	4.37	5.04	6.43		4.95	5.61	5.4	4.6	4.84	5.91	5.27		5.27	4.86	4.12	3.84	4.52							4.91	
4.2.A		4.45	4.67	4.87	5.88	infinito	4.97	7.65	7.09	6.14	6.11	6.33	6.66	4.16	4.2	4.46	4.06	4.86	4.35	0	4.39	2.44	0	3.47	2.06	4.51	
4.2.B		4.49	4.74	6.08	6.26	infinito	5.39	7.39	6.6	6.09	5.5	6.45	6.41	4.83	4.72	4.6	4.46	4.22	4.57	0	4.77	2.45	0	3.52	2.15	4.63	
4.3.A	CCA 0 / F 10			5.89	5.31		5.60							3.24	4.58	4.36	4.9	5.38	4.49	5.84	5.27	5.65	5.4		5.54	5.21	CCA 0 / F 10
4.3.B				5.99	5.46	5.04	5.50							3.9	4.4	4.4	4.93	5.73	4.67	5.69	5.23	5.81	5.57		5.58	5.25	
5.1.A	CCA 0 / F 15		4.39	5.81	6.21		5.47		6.17		6.37	6.6	6.38	5.65	5.57	5.55	4.73	4.37	5.17		1.91		1.85	1.85	1.87	4.72	CCA 0 / F 15
5.1.B				5.5	6.16		5.83		6.84		5.93	7.8	6.86	5.52	5.3	4.96	4.55	4.32	4.93		2.45		1.95	1.76	2.05	4.92	
5.2.A		5.92	5.41		5.76		5.70		6.36	6.19	5.89	6.63	6.27	6.63	4.64	5.34	5.33	4.96	5.38	4.25	2.97	4.4	3.17	1.86	3.33	5.17	
5.2.B		6.14	5.41		5.97		5.84	7.95	6.82	6.97	6.9	7.84	7.30	6.3	5	6.12	5.91	5.05	5.68	3.8	2.87	4.33	3.16	1.73	3.18	5.50	
5.3.A	CCA 0 / F 15	7.85	6.18	5.97	6.01	5.83	6.37	2.03	3.3	3.3			2.88		6.81	6.38		7.11	6.77	7.49	5.8	5.35	5.87		6.13	5.53	CCA 0 / F 15
5.3.B		7.31	5.78	6.14	6.38	6.58	6.44	2.14	3.62	3.04			2.93	5.08	7.11	6.83		infinito	6.34	7.04	5.96	5.67	5.61	infinito	6.07	5.45	
6.1.A	CCA 0 / F 20	infinito	8.04	6.54	7.17	7.01	7.19		4.02		4.37	5.26	4.55	5.64	8.06	7.29	7.62	infinito	7.15		8.03		8.38		8.21	6.77	CCA 0 / F 20
6.1.B		8.04	6.85	7.1	7.91		7.48		4.51	3.87	4.21	4.87	4.37	5.81	8.45	7.46	8.09	infinito	7.45		8.77	7.22	8.92	infinito	8.30	6.90	
6.2.A		infinito	8.32	8.18	8.18		8.23	infinito		6.4	5.48	5.18	5.69	2.55	2.23	2.21	2.21	2.17	2.27	5.03	5.61	5.62	6.32	infinito	5.65	5.46	
6.2.B		7.95	8.84	8.85	infinito		8.55	infinito	8.12	6.86	6.08	6	6.77	2.45	2.42	2.39	2.12	2.11	2.30	5.17	6.54	6.19	7.17	infinito	6.27	5.97	
6.3.A	CCA 0 / F 20		9.14		9.16		9.15	infinito		6.62	6.67	6.12	6.47	2.59	3.41	3.81	4.26	3.62	3.54	7.12	7.07	6.88	7.67	infinito	7.19	6.59	CCA 0 / F 20
6.3.B		9.14			9.23		9.19	infinito		6.9	6.89	5.37	6.39	2.79	2.96	3.25	2.92	2.92	2.98	7.77	7.12	6.9	8.11	infinito	7.48	6.51	
7.1.A	CCA 0 / F 25	8.5	8.39	7.89	7.72	infinito	8.13	infinito	7.92	8.12	8.53	infinito	8.19	infinito	8.24	7.17	6.5	8.54	7.61	infinito	5.64	5.89	5.92	7.72	6.29	7.56	CCA 0 / F 25
7.1.B		8.32	7.99	8.1	8.29	infinito	8.18	infinito	7.51	7.55	8.77	9.82	8.41	infinito	7.2	6.91	6.91	8.12	7.29	infinito	5.63	5.64	5.74	infinito	5.67	7.39	
7.2.A		9.26	7.72	7.73	7.96	infinito	8.17	infinito	8.4	7.42	7.65	infinito	7.82	infinito	7.05	7.06	6.96	7.4	7.12	infinito	4.91	5.22	5.23	infinito	5.12	7.06	
7.2.B		8.88	7.97	7.91	8.04	infinito	8.20	infinito	9.05	7.89	8.87	infinito	8.60	infinito	8.06	7.97	7.72	9.41	8.29	infinito	4.84	5.19	5.19	infinito	5.07	7.54	
7.3.A	CCA 0 / F 25	9.26	8.42	7.06	7.54	infinito	8.07	infinito	8.25	8.26	8.89		8.47	infinito	6.54	6.76	7.1	8.72	7.28		6.44	6.45	6.45	infinito	6.45	7.57	CCA 0 / F 25
7.3.B		9.38	8.3	6.67	7.56	infinito	7.98	9.92	8.43	8.42	8.58		8.84	infinito	6.84	6.5	6.77	8.37	7.12		6.27	6.77	6.17	infinito	6.40	7.58	
8.1.A	CCA 0 / F 30	10.15	8.19	8.98	10	infinito	9.33	infinito	10.4	10.4	10.05	infinito	10.28	infinito	9.58	9	9.36	9.74	9.42	infinito	7.01	6.31	6.94	infinito	6.75	8.95	CCA 0 / F 30
8.1.B		9.44	8.41	8.99	10.3	infinito	9.29	infinito	10.18	10.17	10.35	infinito	10.23	infinito	9.21	8.74	9.12	10.13	9.30	infinito	6.98	6.08	6.61	infinito	6.56	8.84	
8.2.A		11.06	9.4	9.39	11.86	infinito	10.43	infinito	11.64	10.47	11.12	infinito	11.08	infinito	9.97	8.49	8.71	10.9	9.52	infinito	6.55	5.64	6.74	infinito	6.31	9.33	
8.2.B		10.45	9.61	9.49	10.75	infinito	10.08	infinito	10.77	9.56	10.49	infinito	10.27	infinito	9.65	8.95	8.76	infinito	9.12	infinito	6.5	5.32	6.18	infinito	6.00	8.87	
8.3.A	CCA 0 / F 30	infinito	9.37	9.89	11.9	infinito	10.39	infinito	13.1	12.04	11.6	infinito	12.25	infinito	10.27	9.12	8.79	9.64	9.46	infinito	6.31	5.83	7.31	infinito	6.48	9.64	CCA 0 / F 30
8.3.B		11.83	9.2	9.63	infinito	infinito	10.22	infinito	12.68	11.72	11.2	infinito	11.87	infinito	10.14	9.27	9.16	9.53	9.53	infinito	6.58	6.16	7.76	infinito	6.83	9.61	
9.1.A	CCA A 5 / F 0	4.21	4.12	4.12	5.17	6.48	4.82	4.2	3.99	4.64	4.21	4.95	4.40	4.61	4.02	3.68	3.68	3.66	3.93							3.29	CCA A 5 / F 0
9.1.B		4.83	4.42	4.68	5.04	6.9	5.17	4.48	4.19	4.49	4.79	4.72	4.53	3.72	3.78	3.39	3.89	3.39	3.63							3.34	
9.2.A		4.05	4.28	4.01	4.48		4.21		5.19	4.79	4.39	4.19	4.64	4.56	4.22	3.71	3.57	3.24	3.86	0	0	2.74	2.74	2.05	1.51	3.55	
9.2.B		4.15	4.15	3.91	4.35		4.14		5.51																		

11.1.A	CCA A 15 / F 0	5.57	5.53	4.38	6.09	5.39	5.81	6.84	6.95	7.8	6.85	infinito	5.45	5.24	5.55	4.65	5.22	3.28	3.22	3.68	4.23	3.60	5.27			
11.1.B		5.44	5.39	4.62	5.91	5.34	5.64	6.59	6.76	7.53	6.63	infinito	5.35	5.22	5.74	4.34	5.16	3.3	3.36	3.74	4.08	3.62	5.19			
11.2.A		4.76	5.44	4.89	5.25	5.09	7.62	6.95	5.93	5.7	7.48	6.74	infinito	5.56	5.55	3.99	3.59	4.67	4.29	4	3.99	3.61	3.58	3.89	5.10	
11.2.B		4.6	5.59	5.08	5.32	5.15	7.84	6.98	5.82	5.51	7.94	6.82	infinito	5.22	5.63	4.02	3.64	4.63	4.66	4.33	3.82	3.66	3.36	3.97	5.14	
11.3.A	CCA A 20 / F 0	5.88	5.75	5.5	5.94	5.97	5.73	5.48	4.93	4.92	5.28	infinito	4.68	4.23	3.85	4.16	4.23	3.72	3.72	3.24	3.31	3.98	3.59	4.77		
11.3.B		5.9	5.49	5.27	6.07	5.68	5.47	5.37	5.31	4.86	5.69	5.34	infinito	4.61	4.07	3.92	4.19	4.20	3.37	3.42	3.42	3.7	3.66	3.51	4.68	
12.1.A		5.51	5.84	infinito	infinito	5.68	infinito	6.96	6.77	6.51	6.76	6.75	6.7	6.13	5.64	5.27	5.83	5.91	5.26	4.79	4.6	4.55	5.04	4.85	5.80	
12.1.B		5.27	5.64	infinito	infinito	5.46	infinito	7.26	6.83	6.57	6.75	6.85	6.63	5.78	5.28	5.04	5.74	5.69	5.25	4.87	4.53	4.3	5.1	4.81	5.70	
12.2.A	CCA A 25 / F 0	6.35	6.08	5.96	6.52	6.23	infinito	7.86	7.37	7.1	6.55	7.22	6.41	5.5	5.45	5.39	5.55	5.66	4.69	4.23	4.17	4.16	4.53	4.36	5.87	
12.2.B		6.58	5.95	6.19	6.47	6.30	infinito	7.78	7.77	7.25	6.74	7.39	6.72	5.48	5.38	5.28	5.86	5.74	4.38	4.43	4.4	4.19	4.59	4.40	5.96	
12.3.A		5.59	5.61	5.17	7.73	6.03	infinito	6.8	6.41	6.14	6.89	6.56	6.39	4.92	4.62	5.16	5.88	5.39	4.78	3.68	3.86	4.08	4.36	4.15	5.53	
12.3.B		5.24	5.37	5.32	7.7	5.91	infinito	7.07	6.37	6.07	6.72	6.56	6.79	4.8	4.73	5.43	6.03	5.56	4.74	3.75	3.74	4.03	4.82	4.22	5.56	
13.1.A	CCA A 30 / F 0	5.05	5.42	6.48	6.48	5.86	8.1	6.07	6.93	6.91	8.81	7.36	infinito	7.04	6.89	6.08	5.84	6.46	5.24	4.12	4.73	5.36	5.35	4.96	6.16	
13.1.B		5.19	5.37	6.28	6.37	6.12	7.92	6.24	6.68	6.66	8.07	7.11	infinito	7.03	6.77	5.82	5.87	6.37	5.19	4.09	4.62	5.03	5.45	4.88	6.12	
13.2.A		5.32	5.32	5.86	5.87	5.73	6.14	5.96	6	6.16	6.62	6.18	6.45	5.27	5.05	5.62	5.06	5.49	3.97	3.87	4.02	3.76	4.89	4.10	5.38	
13.2.B		5.12	5.01	5.53	6.08	5.74	6.69	6.27	6.11	5.91	7.17	6.43	6.22	5.67	5.19	5.4	5.23	5.54	4.23	3.92	4.37	4.09	4.95	4.31	5.51	
13.3.A	CCA A 35 / F 0	5.85	6.04	5.39	5.65	6.09	7.98	6.32	5.89	6.4	7.4	6.80	6.92	5.61	5.26	5.25	5.21	5.65	3.2	3.33	3.62	3.79	3.89	3.57	5.53	
13.3.B		5.79	6.29	5.48	5.76	6.19	7.91	6.24	5.8	6.49	7.5	6.79	6.97	5.59	5.1	5.32	5.02	5.60	2.89	3.12	3.4	3.28	4.01	3.34	5.48	
14.1.A		6.49	6.53	6.54	7.23	6.70	infinito	7.91	7.86	8.66	8.56	8.25	infinito	6.89	6.11	5.84	6	6.21	5.47	5.39	5.61	5.46	6.92	5.77	6.73	
14.1.B		6.71	6.71	6.73	7.46	6.90	infinito	7.9	7.84	8.56	8.96	8.32	infinito	6.94	6.31	6.04	5.99	6.32	5.28	5.15	5.89	5.5	5.46	6.75	6.75	
14.2.A	CCA A 30 / F 5	7.33	5.6	5.54	6.05	6.13	7.18	6.43	6.63	7.45	8.44	7.23	infinito	7.53	7.5	7.96	8.34	7.83	infinito	6.06	5.94	5.89	7.13	6.26	6.86	
14.2.B		7.73	5.97	5.51	6.25	6.37	7.18	6.18	6.3	7.55	8.26	7.09	infinito	7.71	7.17	8.05	8.58	7.88	infinito	5.93	5.9	5.95	7.29	6.27	6.90	
14.3.A		7.48	7.08	7.23	7.23	7.26	infinito	8	8.41	8.42	infinito	8.28	infinito	7.22	6.01	6.11	6.57	6.48	5.71	5.32	5.24	5.28	5.39	6.85	6.85	
14.3.B		7.57	7.56	7.49	7.24	7.47	infinito	8.21	8.36	8.62	infinito	8.40	infinito	7.38	6.28	5.77	6.2	6.41	5.88	5.26	5.13	5.7	5.49	6.94	6.94	
15.1.A	CCA A 5 / F 5	5.13	5.12	5.21	5.18	5.29	4.08	4.09	4.16	2.81	2.53	3.53	4.01	4.9	3.28	6.17	4.59	5.55	5.19	5.15	5.76	5.83	5.50	4.73		
15.1.B		5.44	5.14	5.47	5.54	5.50	4.16	4.21	2.54	2.44	3.34	3.34	3.93	4.55	3.31	6.38	4.54	5.31	5.03	5.04	5.79	5.97	5.43	4.70		
15.2.A		6.63	5.69	5.58	5.02	5.57	3.3	3.34	2.47	3.3	3.10	3.10	5.07	5.47	5.32	4.96	5.21	5.21	5.26	5.94	5.03	6.32	5.64	4.88		
15.2.B		6.6	5.66	5.63	4.96	5.56	3.21	3.23	2.5	3.31	3.06	3.06	5.14	5.79	5.23	4.96	5.28	5.28	5.31	5.74	5.33	6.51	5.72	4.91		
15.3.A	CCA A 10 / F 5	5.64	5.64	5.5	5.48	5.57	3.99	3.79	2.96	3.38	3.12	3.45	4.18	4.31	5.03	4.59	4.53	6.43	6.19	6.08	6.1	7.86	6.53	5.02		
15.3.B		5.68	5.71	5.65	5.71	5.69	3.91	3.62	2.8	3.43	3.11	3.37	4.27	4.68	4.96	4.33	infinito	4.56	6.34	5.98	6	6.09	7.95	6.47	5.02	
16.1.A		5.51	5.52	5.96	5.98	5.74	7.35	6.68	5.65	5.28	7.41	6.47	infinito	6.3	4.87	4.75	4.52	5.11	infinito	4.57	4.01	3.77	4.51	4.22	5.39	
16.1.B		5.29	5.55	6.07	5.99	5.73	7.66	6.81	5.71	5.48	6.92	6.52	infinito	6.23	4.63	4.76	4.57	5.05	infinito	4.4	4.23	3.49	4.81	4.23	5.38	
16.2.A	CCA A 15 / F 5	5.23	5.2	5.19	5.19	5.37	7.06	6.59	5.69	6.61	6.07	6.40	5.41	4.56	4.63	4.54	4.44	4.72	4.37	4.26	4.04	4.03	4.15	4.17	5.17	
16.2.B		5.48	5.07	5.12	5.17	5.41	6.89	6.55	5.85	6.54	6.18	6.40	5.23	4.34	4.57	4.57	4.29	4.60	4.3	4.29	4.24	4.2	4.2	4.25	5.16	
16.3.A		4.83	6.01	5.57	5.15	5.46	6.91	7.76	7.31	5.45	6.72	6.83	5.62	5.21	4.73	4.63	4.23	4.88	3.29	3.83	3.45	3.57	3.54	5.18		
16.3.B		4.98	6.07	5.75	5.17	5.59	6.84	7.71	7.22	5.47	6.77	6.80	5.63	5.62	5.05	4.84	4.2	5.07	3.1	3.85	3.42	3.23	3.40	5.21		
17.1.A	CCA A 20 / F 5	5.78	5.76	6.75	7.47	6.44	6.34	3.48	3.33	3.59	4.33	4.21	4.36	4.78	4.92	5.34	7.36	5.35	6.35	6.28	6.49	6.5	8.26	6.78	5.70	
17.1.B		5.73	5.88	6.8	7.65	6.52	6.35	3.69	3.24	3.61	4.51	4.28	4.23	4.67	4.96	5.57	7.49	5.38	6.17	6.28	6.47	6.44	8.12	6.70	5.72	
17.2.A		7.05	5.86	5.71	5.45	5.97	4.03	3.45	3.96	3.56	3.56	3.71	4.26	4.58	4.87	5.07	5.48	4.85	7.83	7.04	8.08	7.88	7.36	7.64	5.54	
17.2.B		7.35	6.03	5.69	5.48	6.05	4.18	3.21	3.72	3.4	3.4	3.58	4	4.6	4.94	5.22	5.55	4.86	7.55	6.93	7.79	7.7	7.42	7.48	5.49	
17.3.A	CCA A 25 / F 5	5.69	4.99	4.81	5.15	5.31	3.57	3.56	3.01	3.04	3.14	3.26	infinito	4.1	5.87	5.84	7.28	5.77	5.98	5.99	5.86	5.84	6.45	6.02	5.09	
17.3.B		5.89	4.96	4.8	5.44	5.37	2.83	2.81	3.07	2.93	2.98	2.92	infinito	4.17	5.54	6.09	7.14	5.74	6.07	6.09	5.82	6	6.39	6.07	5.03	
18.1.A		infinito	6.48	6.48	6.08	6.18	6.31	6.16	5.36	5.29	5.35	5.77	5.59	5.79	5.78	5.56	5.66	7.33	6.02	8.28	6.69	6.7	6.78	8.59	7.41	6.33
18.1.B		infinito	6.6	6.4	6.12	6.21	6.33	6.2	5.39	5.37	5.05	5.69	5.54	5.68	5.6	5.61	5.55	7.12	5.91	8.19	6.79	6.8	6.76	8.54	7.42	6.30
18.2.A	CCA A 30 / F 5	infinito	7.45	6.13	6.42	6.73	6.56	5.38	4.93	4.63	5.06	5.31	6.37	5.25	5.8	6.47	6.4	6.06	7.1	7.01	7.23	7.91	7.31	6.35		
18.2.B		infinito	7.78	6.05	6.3	6.75	6.72	6.32	5.25	4.97	4.46	4.92	5.18	6.58	5.37	5.81	6.29	6.11	7.21	7.19	7.15	7.85	7.35	6.34		
18.3.A		6.77	6.98	7.25	9.08	7.88	infinito	6.84	6.7	6.69	7.03	6.82	infinito	5.49	5.47	5.46	4.92	5.34	4.36	4.42	4.91	5.21	5.58	4.90	6.23	
18.3.B		6.95	6.95	7	9.15	7.87	infinito	6.78	6.81	6.7	7.02	6.83	infinito	5.68	5.56	5.49	5.06	5.45	4.34	4.37	4.62	4.97	5.62	4.78	6.23	
19.																										

22.1.A	CCA G 10 / F 0	5.85	5.15	5.65		5.55	6.48	6.45	4.09	3.76		5.20		5	4.01	3.33		4.11	2.6	2.41	2.7	2.69		2.60	4.36	4.35	CCA G 10 / F 0	
22.1.B		6.12		5.33	5.8		5.75	6.6	6.64	4.02	3.89		5.29		5.07	4	3.22		4.10	2.72	2.44	2.97	2.85		2.75			4.47
22.2.A		4.51	4.44	4.26	4.47		4.42		5.07	5.65	5.37	7.28	5.84	5.72	4.37	3.8	4.42	4.5	4.56	2.52	2.08	2.17	2.26	2.23	2.25			4.27
22.2.B		4.45	4.67	4.36	4.59		4.52		5.19	5.79	5.5	7.48	5.99	5.63	4.45	3.63	4.6	4.53	4.57	2.39	2.02	2.15	2.24	2.2	2.20			4.32
22.3.A			5.31	4.95	4.72	4.53	4.88	2.78	2.78		2.32	2	2.47		4.34	4.34	3.75		4.14	7.05	5.24	6.24	5		5.88			4.34
22.3.B		5.18	4.94	4.8	4.4	4.83	2.61	2.61		2.38	2.23	2.46		4.53	4.51	3.84		4.29	6.9	5.11	6.36	5		5.84	4.36			
23.1.A	CCA G 15 / F 0	4.03	4.04	4.72	4.69		4.37		6.1	5.36	5.37	6.35	5.80		5.39	4.01	4	4.01	4.35	3.35	3.64	3.18	3.19	3.43	3.36	4.47		
23.1.B		4.23	3.93	4.84	4.51		4.38		6.11	5.35	5.35	6.09	5.73		5.7	4.26	4.1	4.07	4.53	3.42	3.73	3.3	2.76	3.44	3.33	4.49		
23.2.A		4.32	4.33	5.69	4.75		4.77	5.61	5.8	5.8	5.63		5.71	4.12	4.42	4.26	4.43	4.85	4.42		3.01	2.87	2.64	2.62	2.79	4.42		
23.2.B		4.56	4.64	5.58	4.82		4.90	5.53	5.75	5.96	5.49		5.68	4.01	4.32	4.4	4.65	4.89	4.45		3.11	3	2.36	2.66	2.78	4.45		
23.3.A		5.16	4.87	4.92	5.15	4.74	4.97	4.38	5.31	3.57	3.91	3.9	4.21	4.11	4.12	4.03	4.23	5.83	4.46	6.38	5.92	5.56	5.12	6.9	5.98	4.91		
23.3.B	5.1	4.83	4.84	4.99	4.97	4.95	4.39	5.42	3.62	4.01	4	4.29	4	3.99	4.11	4.12	5.61	4.37	6.19	5.81	5.59	5.18	7.04	5.96	4.89			
24.1.A	CCA G 20 / F 0	5.18	5.39	5.53	5.96		5.52	6.69	5.8	5.75	5.72	6.78	6.15	5.85	5.12	4.94	5.12	5.11	5.23	5.12	4.53	4.04	4.06	4.1	4.37	5.32		
24.1.B		5.22	5.55	5.52	6.03		5.58	6.49	5.75	5.76	5.75	6.61	6.07	5.94	5.24	4.85	5.05	5.04	5.22	5.05	4.56	4.16	4.15	4.13	4.41	5.32		
24.2.A		4.87	4.6	4.81	5.84	6.6	5.34	6.81	5.8	5.76	5.8	6.09	6.05	6.33	6.14	5.03	4.88	4.6	5.40	3.96	3.97	4.06	4.1	4.1	4.04	5.21		
24.2.B		4.74	4.59	4.92	5.76	6.59	5.32	6.91	5.85	5.86	5.85	6.06	6.11	6.44	6.29	5.16	4.92	4.75	5.51	3.89	3.81	4	3.98	4	3.94	5.22		
24.3.A		infinito	4.53	4.21	4.54	4.81	4.52	4.8	4.08	4.05	4.04	4.05	4.20	4.43	4.86	4.77	4.81		4.72	7.65	6.85	6.67	6.72		6.97	5.10		
24.3.B	infinito	4.62	4.05	4.49	4.81	4.49	4.81	3.92	3.92	3.93	3.94	4.10	4.3	4.61	4.89	4.92		4.68	7.56	6.78	6.56	6.52		6.86	5.03			
25.1.A	CCA G 25 / F 0		5.28	6.58	6.39	6.45	6.18	8.38	8.36	6.18	6.36	6.55	7.17	5.85	5.72	5.1	5.08	6.56	5.66	6.26	5.05	5.06	5.04		5.35	6.09		
25.1.B			5.4	6.43	6.29	6.66	6.20	8.37	8.36	6.21	6.48	6.67	7.22	5.9	5.68	5.27	4.97	6.42	5.65	6.34	4.99	4.98	4.98		5.32	6.10		
25.2.A			5.47	5.74	5.86	5.87	5.74	4.06	4.77	4.66	4.67	5.21	4.67	5.27	5.21	5.2	5.21	5.28	5.23	5.82	5.86	6.22	5.96	7.11	6.19	5.46		
25.2.B			5.3	5.49	5.66	5.82	5.57	3.99	4.51	4.53	4.66	5.54	4.65	5.33	5.32	5.31	5	5.51	5.29	5.87	5.97	6.46	5.96	7.03	6.26	5.44		
25.3.A			7.85	6.69	6.49	6.45	6.48	6.79	5.22	5.47	5.46	5.8	6.02	5.59	5.81	5.3	5.24	6.08	5.61	5.74	6.1	6.13	6.14	6.59	6.14	6.03		
25.3.B		7.91	6.67	6.5	6.4	6.54	6.80	5.16	5.5	5.35	5.75	6.05	5.56	5.72	5.55	5.16	6.02	6.98	5.89	5.24	6	6.21	6.16	6.4	6.00	6.06		
26.1.A	CCA G 30 / F 0	infinito	5.53	5.12	5.35	6.53	5.63	5.3	5.04	5.03	5.03	7.41	5.56	7.02	5.7	5.78	6.29	infinito	6.20	8.47	8.02	7.59	7.12	9.3	8.10	6.37		
26.1.B		infinito	5.62	5.1	5.29	6.52	5.63	5.46	5.18	5.14	5.06	7.35	5.64	7.05	5.8	5.8	6.19	infinito	6.21	8.58	8.04	7.39	7.14	9.25	8.08	6.39		
26.2.A		6.47	5.74	5.46	6.51	infinito	6.05	7.22	7.09	7.55	6.45	7.65	7.19	7.78	6.34	5.48	5.39	5.97	6.19	5	4.64	4.67	6.11	6.6	5.40	6.21		
26.2.B		6.57	5.75	5.65	6.61		6.15	8.31	7.83	7.83	6.23	7.34	7.51	7.81	6.35	5.62	5.49	5.78	6.21	4.95	4.55	4.59	6.01	6.62	5.34	6.30		
26.3.A		7.26	6.83	5.96	5.51	8.03	6.72	6.89	6.68	6.14	7.76	infinito	6.87	infinito	7.9	8.52	7.39	8.54	8.09		5.95	5.93	6.67	6.59	6.29	6.99		
26.3.B	7.34	6.97	6.12	5.46	7.99	6.78	6.77	6.52	6.2	7.55	infinito	6.76	infinito	7.78	8.51	7.28	8.46	8.01		5.93	5.91	6.77	6.61	6.31	6.96			
27.1.A	CCA G 5 / F 5	5.34	5.61	5.51	5.87		5.58	6.49	5.78	5.45	5.31	6.51	5.91	5.79	6.01	6.01	4.72	4.08	5.32	3.43	3.09	4.07	4.07	3.11	3.55	5.09		
27.1.B		5.26	5.75	5.36	5.9		5.57	6.6	5.85	5.5	5.47	6.5	5.98	5.9	6.09	6.08	4.85	4.19	5.42	3.4	3.18	4.13	4.18	3.06	3.59	5.14		
27.2.A		3.51	3.59	3.61	3.6	3.99	3.66	5.06	5.05	4.96	4.89	6.72	5.34	5.97	6.76	6.74	5.95	7.37	6.56	5.44	5.46	5.19	5.22	5.61	5.38	5.23		
27.2.B		3.59	3.51	3.74	3.61	3.91	3.67	5.05	5.05	5.04	5.01	6.61	5.35	6.03	6.82	6.81	5.8	7.27	6.55	5.41	5.52	5.1	5.38	5.76	5.43	5.25		
27.3.A		5.19	5.17	5.18	5.29		5.21	6.51	6.03	5.94	5.99	6.81	6.26	5.97	4.63	4.8	4.51	5.77	5.14	3.49	2.89	3.56	3.55	3.58	3.41	5.00		
27.3.B	5.26	5.02	5.13	5.25		5.17	6.6	6.06	5.89	5.89	6.86	6.26	6.03	4.56	4.85	4.41	5.69	5.11	3.46	2.98	3.69	3.59	3.59	3.46	5.00			
28.1.A	CCA G 10 / F 5	4.81	4.8	6.73	6.36	6.65	5.87	6.21	6.43	6.75	6.37	6.6	6.47	5.56	4.81	4.9	4.77	5.38	5.08						5.81			
28.1.B		4.8	4.78	6.82	6.47	6.66	5.91	6.41	6.4	6.74	6.47	6.51	6.51	5.65	4.91	4.97	4.86	5.44	5.17						5.86			
28.2.A		4.7	4.69	4.68	4.98	5.08	4.83	5.38	5.4	5.43	5.38	6.5	5.62	4.92	4.44	4.98	5.05	3.84	4.65						5.03			
28.2.B		4.81	4.68	4.8	5.08	5.14	4.90	5.41	5.39	5.51	5.5	6.37	5.64	5.02	4.51	4.99	5.19	3.86	4.71						5.08			
28.3.A		3.7	3.71	3.72	4.78		3.98	6.03	6.05	5.91	5.9	5.91	5.96	5.52	5.04	5.03	4.98	5.02	5.12						5.02			
28.3.B	3.81	3.79	3.83	4.79		4.06	5.96	5.98	6.03	5.92	5.97	5.97	5.58	5.07	5.06	4.84	4.93	5.10						5.04				
29.1.A	CCA G 15 / F 5		7.42	6.58	6.67	8.46	7.28	6.42	5.96	6.9	6.86	7.19	6.67	7.28	6.63	5.92	5.81	6.03	6.33	6.04	4.18	4.32	5.35		4.97	6.31		
29.1.B			7.36	6.44	6.79	8.39	7.25	6.56	6.03	6.88	6.88	7.23	6.72	7.21	6.69	5.94	5.74	5.97	6.31	6	4.01	4.24	5.18		4.86	6.28		
29.2.A		5.86	5.73	5.72		infinito	5.77	infinito	5.86	6.85	6.89	8.83	7.11	infinito	6.45	5.67	6.19	5.8	6.03	3.96	3.94	3.95	3.96	4.27	4.02	5.73		
29.2.B		5.74	5.75	5.72		infinito	5.74	infinito	5.97	6.82	6.88	8.36	7.01	infinito	6.53	5.76	6.26	5.82	6.09	3.85	3.86	3.94	3.91	4.14	3.94	5.69		
29.3.A		6.53	5.65	5.56	5.71	infinito	5.86	9.14	7.12	7.11	7.07	10.01	8.09	infinito	7.38	7.38	5.68	6.36	6.70	4.79	3.91	3.89	4.02	4.43	4.21	6.22		
29.3.B	6.47	5.79	5.79	5.82	infinito	5.97	9.11	7.11	7.16	7.17	10.03	8.12	infinito	7.25	7.36	5.71	6.33	6.66	4.78	3.95	3.88	3.91	4.36	4.18	6.23			
30.1.A	CCA G 20 / F 5	6.81	6.8	5.15	5.78	infinito	6.14	10.76	9.06	8.01	9.68	9.38	infinito	7.65	6.67	6.54	6.67	6.88	5.2	4.3	4.68	4.75		4.73	6.78			
30.1.B		6.72	6.71	5.14	5.79	infinito	6.09	10.71	9.12	8.08	9.66	9.39	9.39	infinito	7.56	6.63	6.63	6.68	6.88	5.11	4.11	4.56	4.78		4.64	6.75		
30.2.A		5.69	6.43	6.47	6.39	infinito	6.25	9.4	7.92	7.31	7.12	8.89	8.13	7.77	7.02	6.62	6.46	8.04	7.18	6.97	6.04	5.32	6.82	5.55	6.14	6.92		
30.2.B		5.78	6.15	6.22	6.45	infinito	6.15	9.41	7.9	7.48	7.06	8.16	8.00	7.84	7.05	6.59	6.54	8.05	7.21	6.81	5.98	5.24	6.91	5.54	6.10	6.87		
30.3.A		6.11	6.17	6.18	6.51	infinito	6.24	infinito	7.25	7.12	7.13	8.08	7.40	7.46	6.81	6.24	6.97	7.49	6.99	5.17	4.31	4.85	4.86		4.80	6.36		
30.3.B	6.17	6.17	6.09	6.41	infinito	6.21	infinito	7.33	7.33	7.02	8.07	7.44	6.95	6.93	6.16	6.92	7											

ANEXO C – FOTOGRAFÍAS DE LAS SECCIONES OBTENIDAS ANTES Y LUEGO DEL ENSAYO

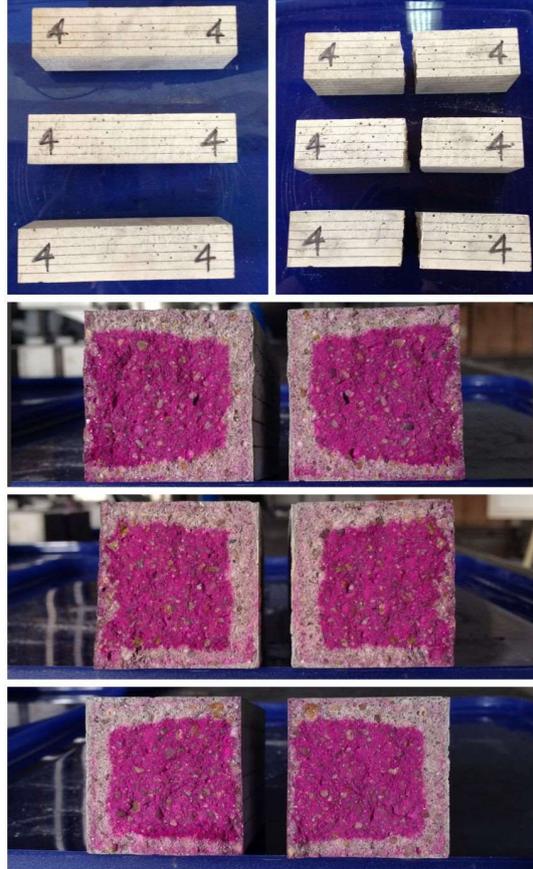
En este anexo se presentan las fotografías de las probetas confeccionadas según el esquema que sigue:



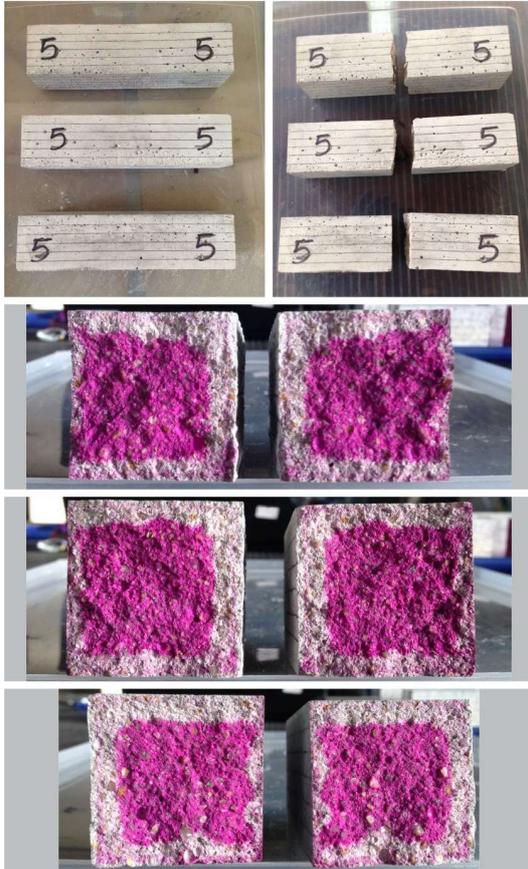
Probeta CCA 0 / F 5



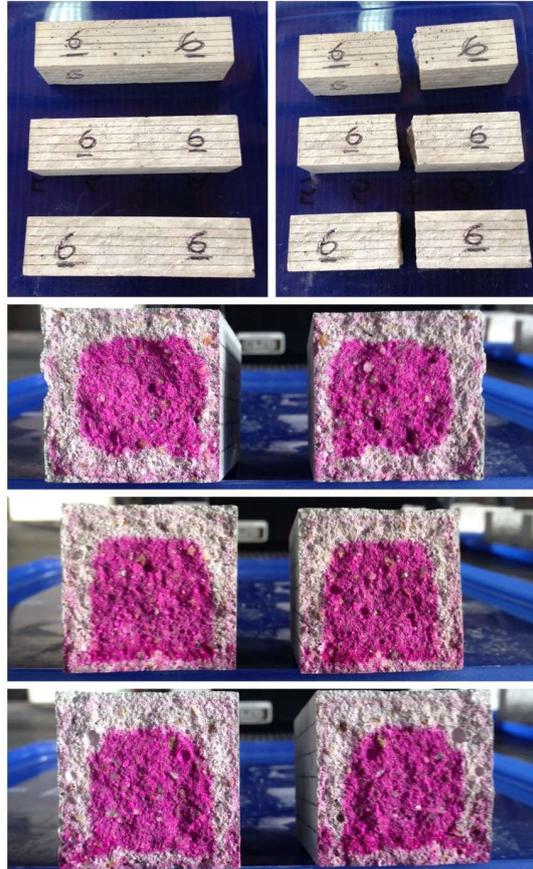
Probeta CCA 0 / F 10



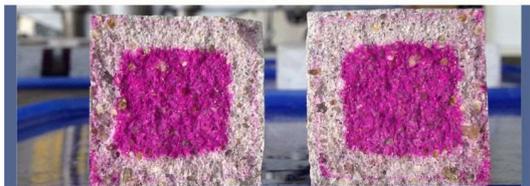
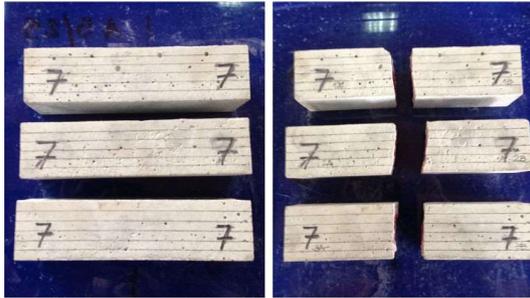
Probeta CCA 0 / F 15



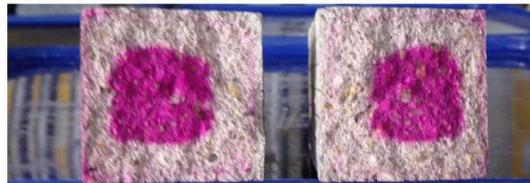
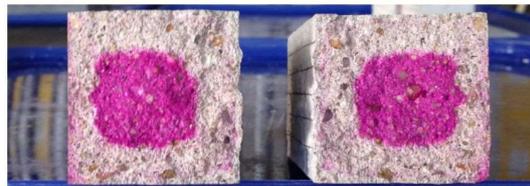
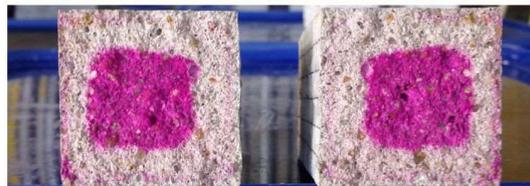
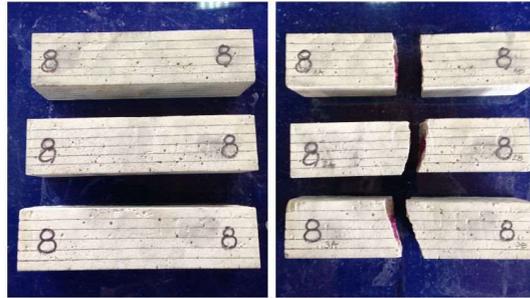
Probeta CCA 0 / F 20



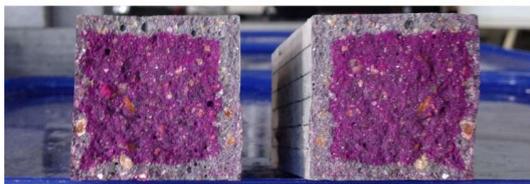
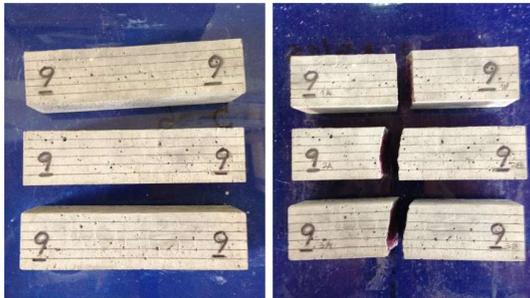
Probeta CCA 0 / F 25



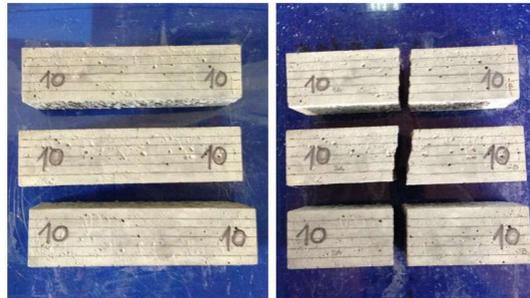
Probeta CCA 0 / F 30



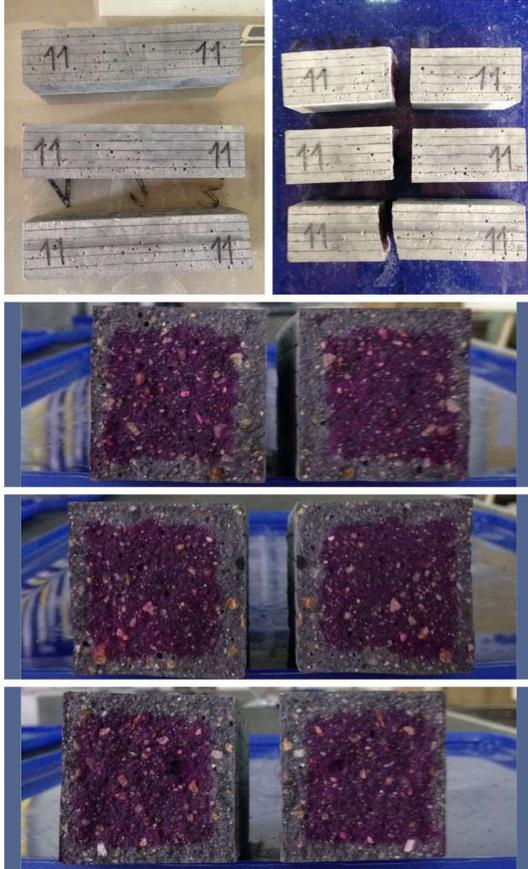
Probeta CCA ARROZUR 5 / F 0



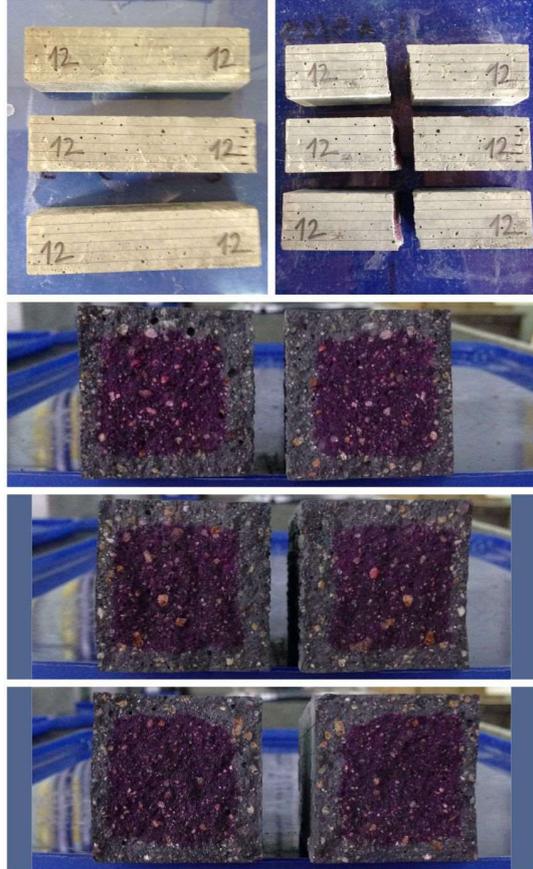
Probeta CCA ARROZUR 10 / F 0



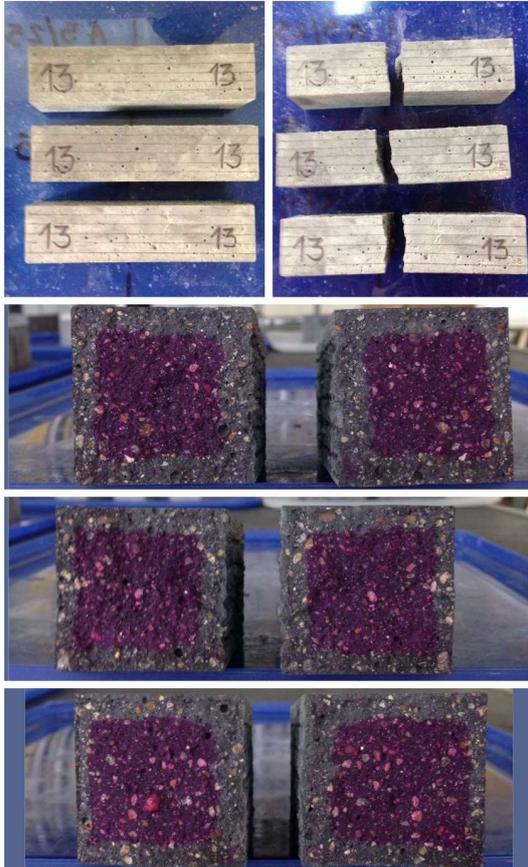
Probeta CCA ARROZUR 15 / F 0



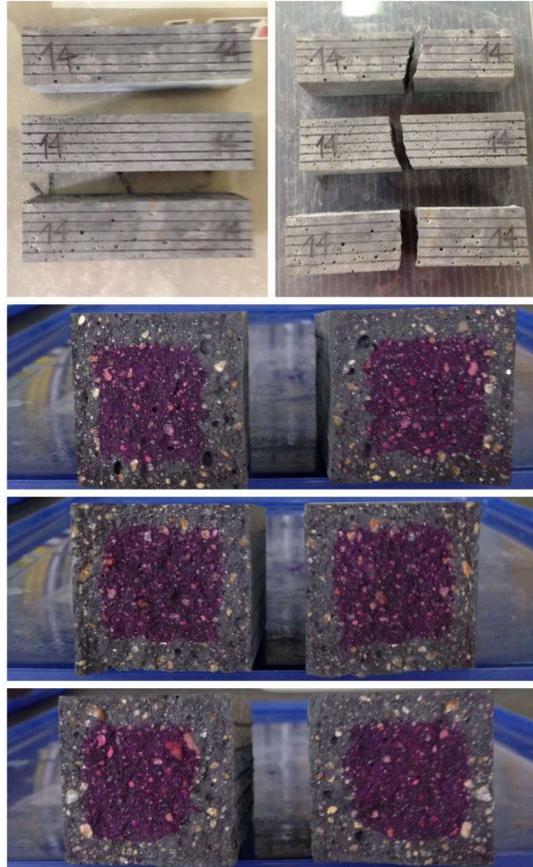
Probeta CCA ARROZUR 20 / F 0



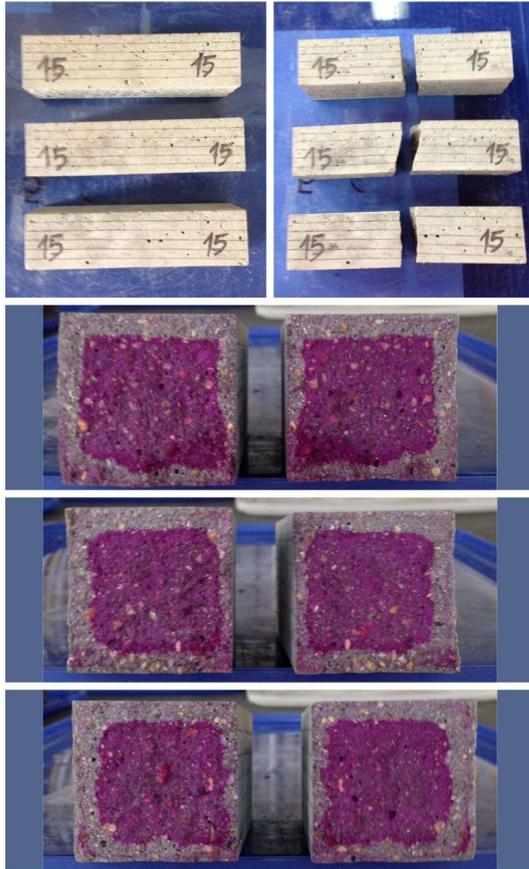
Probeta CCA ARROZUR 25 / F 0



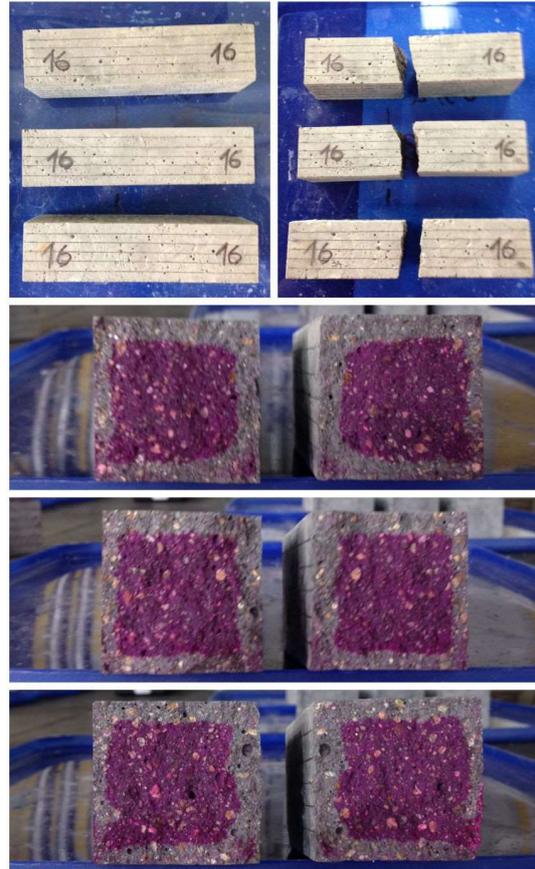
Probeta CCA ARROZUR 30 / F 0



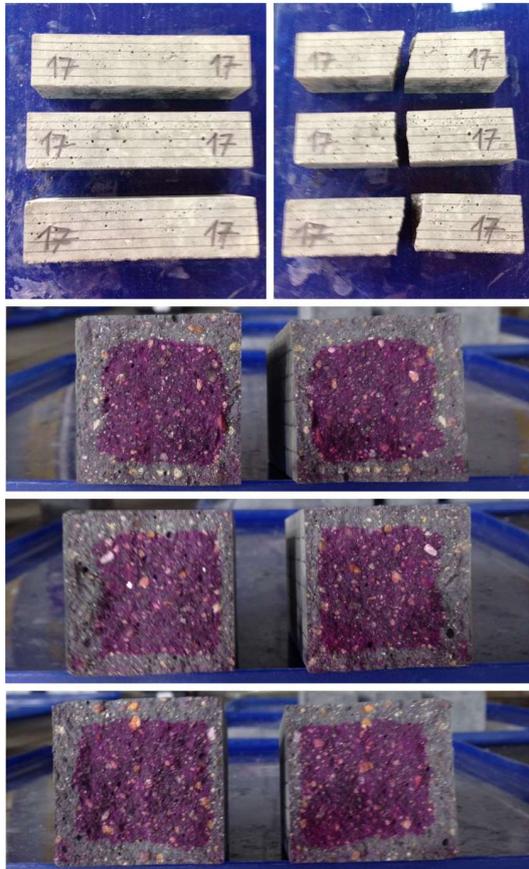
Probeta CCA ARROZUR 5 / F 5



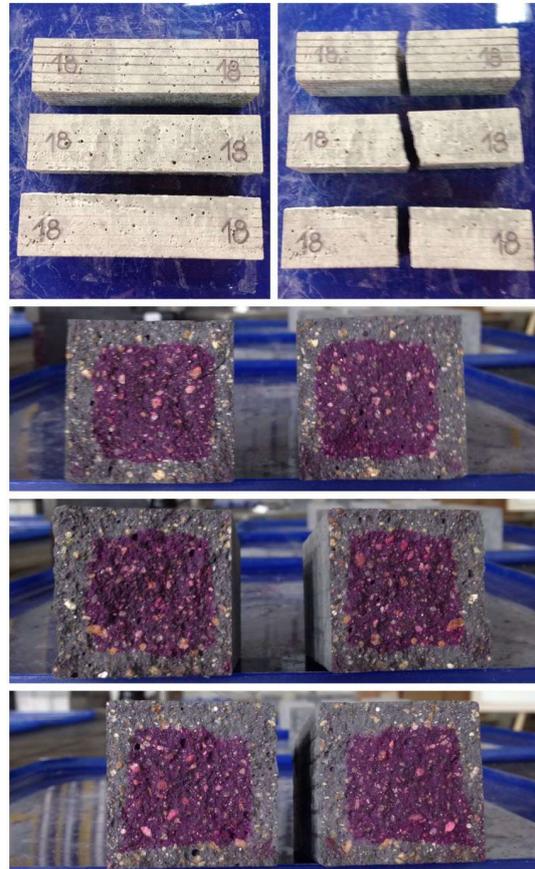
Probeta CCA ARROZUR 10 / F 5



Probeta CCA ARROZUR 15 / F 5



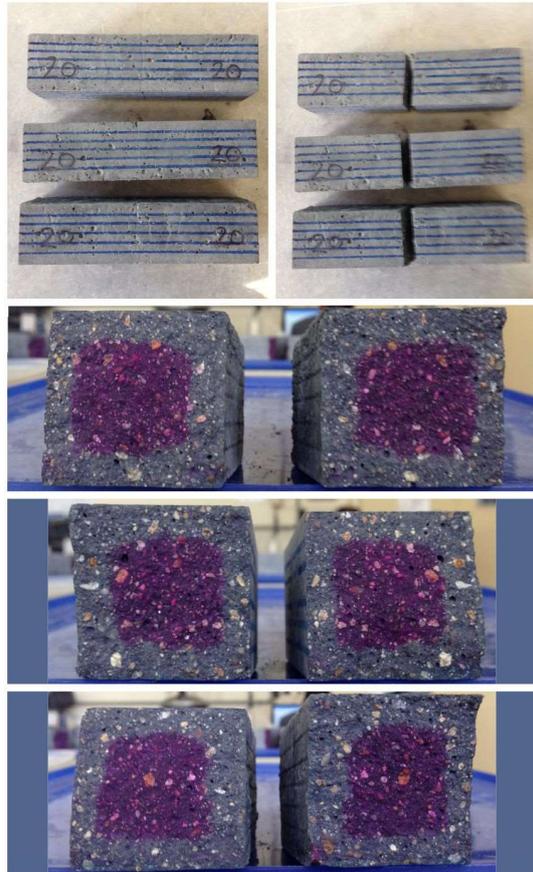
Probeta CCA ARROZUR 20 / F 5



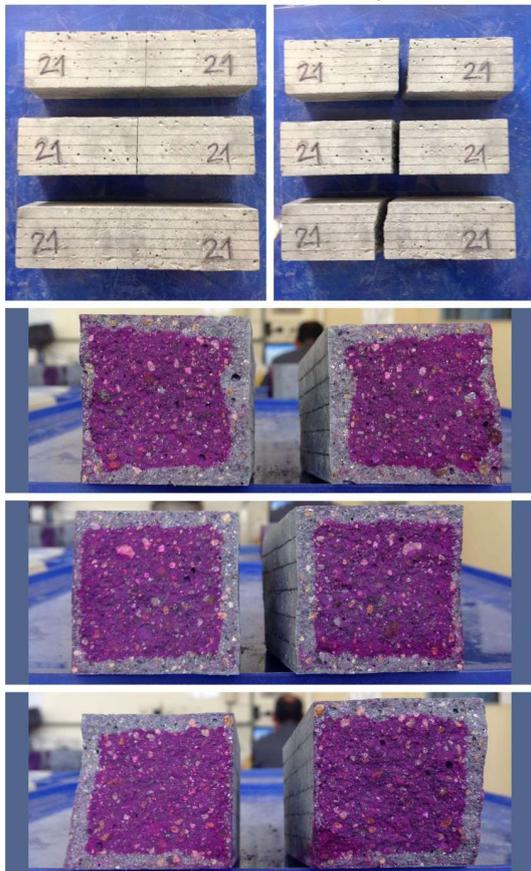
Probeta CCA ARROZUR 25 / F 5



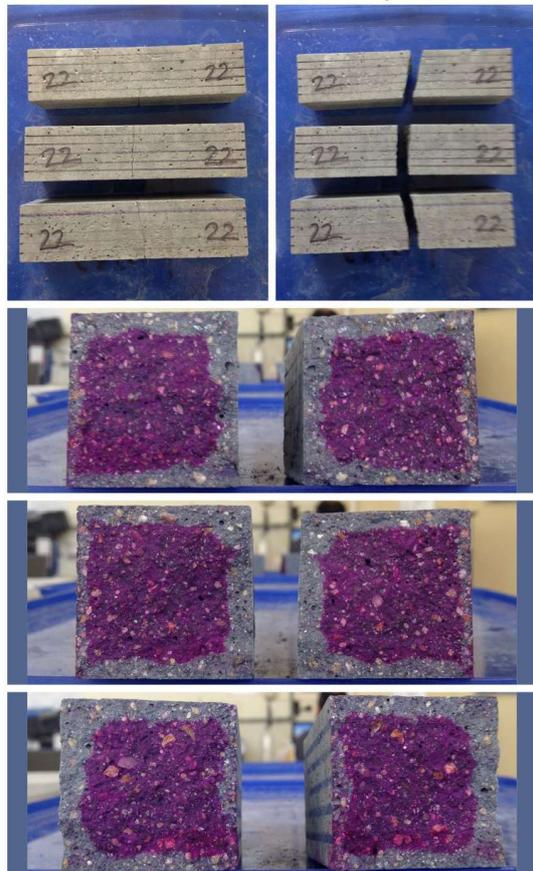
Probeta CCA ARROZUR 30 / F 5



Probeta CCA GALOFER 5 / F 0



Probeta CCA GALOFER 10 / F 0



Probeta CCA GALOFER 15 / F 0

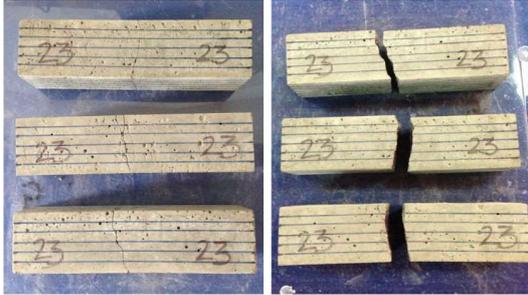


FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

Probeta CCA GALOFER 20 / F 0



FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

Probeta CCA GALOFER 25 / F 0

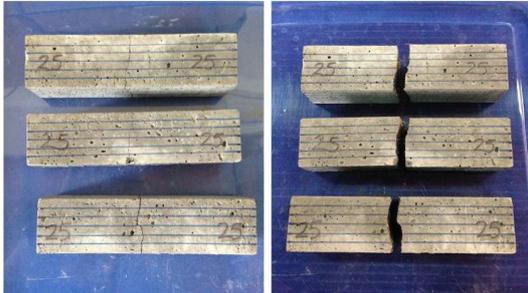
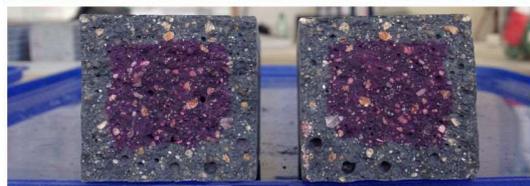


FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

FOTO DAÑADA

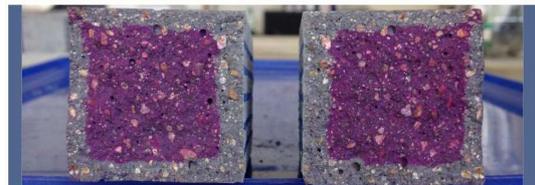
Probeta CCA GALOFER 30 / F 0



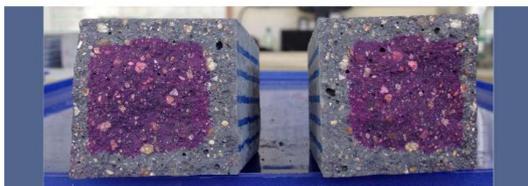
Probeta CCA GALOFER 5 / F 5



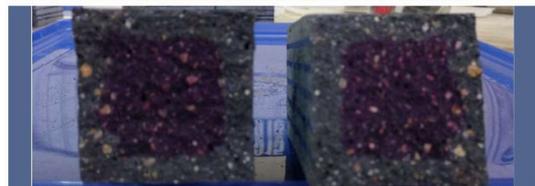
Probeta CCA GALOFER 10 / F 5



Probeta CCA GALOFER 15 / F 5



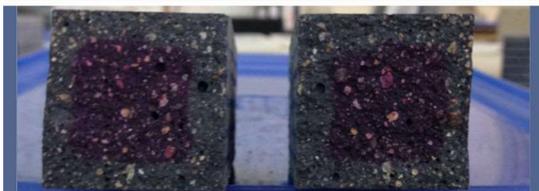
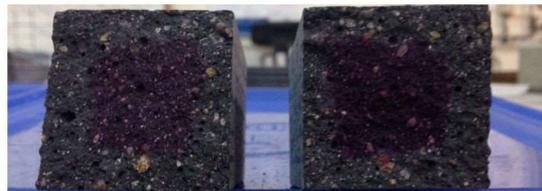
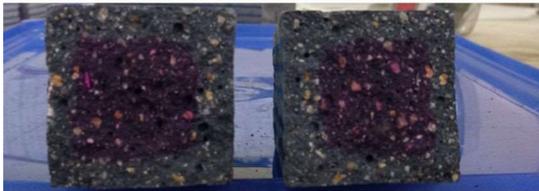
Probeta CCA GALOFER 20 / F 5



Probeta CCA GALOFER 25 / F 5



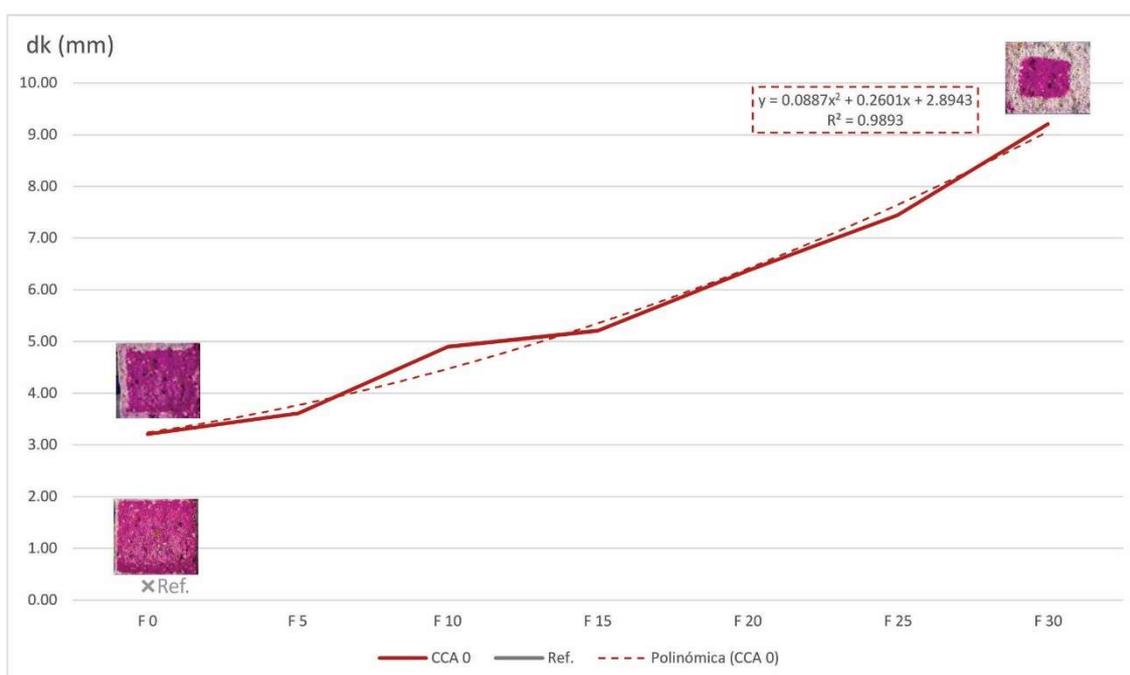
Probeta CCA GALOFER 30 / F 5



ANEXO D – FICHAS

FICHA N° 1 CCA 0

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
1	Ref.	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
4	CCA 0 / F10	405.00	945.00	225.00	405.00	0.00	0%	45.00	10%	0.50
5	CCA 0 / F15	405.00	945.00	225.00	382.50	0.00	0%	67.50	15%	0.50
6	CCA 0 / F20	405.00	945.00	225.00	360.00	0.00	0%	90.00	20%	0.50
7	CCA 0 / F25	405.00	945.00	225.00	337.50	0.00	0%	112.50	25%	0.50
8	CCA 0 / F30	405.00	945.00	225.00	315.00	0.00	0%	135.00	30%	0.50



106

dk (mm)		
1	Ref.	0.27

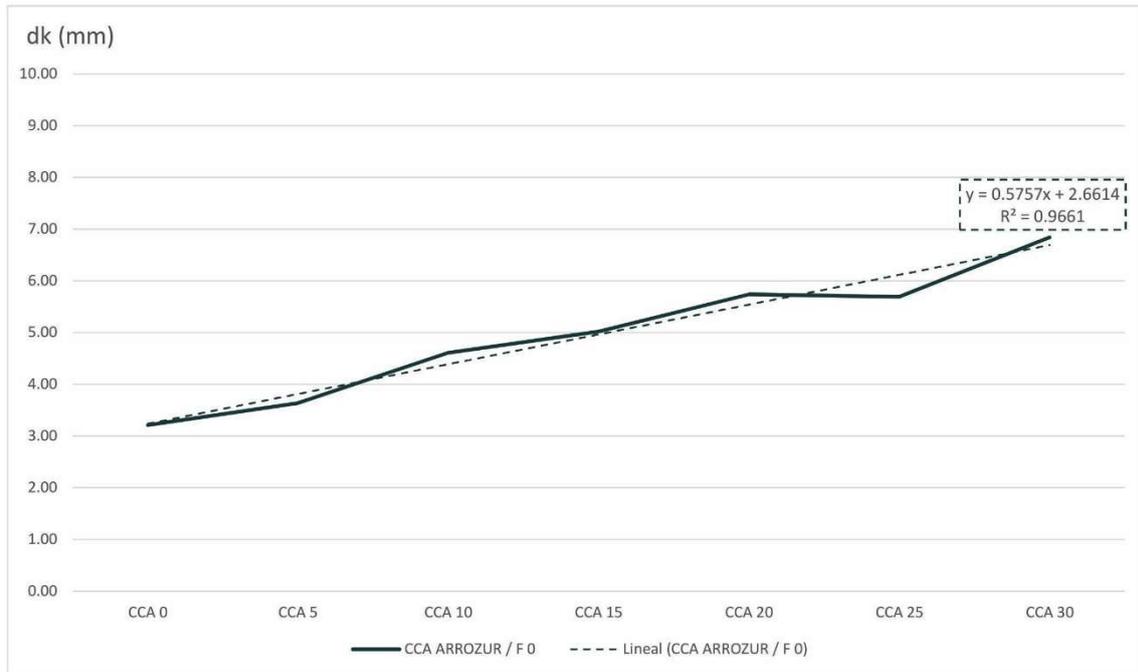
N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
2	CCA 0 / F 0	3.21	0.00	0%
3	CCA 0 / F 5	3.61	0.40	12%
4	CCA 0 / F 10	4.90	1.69	53%
5	CCA 0 / F 15	5.21	2.00	62%
6	CCA 0 / F 20	6.37	3.16	98%
7	CCA 0 / F 25	7.45	4.24	132%
8	CCA 0 / F 30	9.21	6.00	187%

La probeta de Referencia, por tratarse de probeta testigo, no ingresó a la cámara de carbonatación.

La incorporación de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación.

FICHA N° 2 CCA ARROZUR / F 0

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
9	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
10	CCA10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
11	CCA15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
12	CCA20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
13	CCA25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50
14	CCA30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50



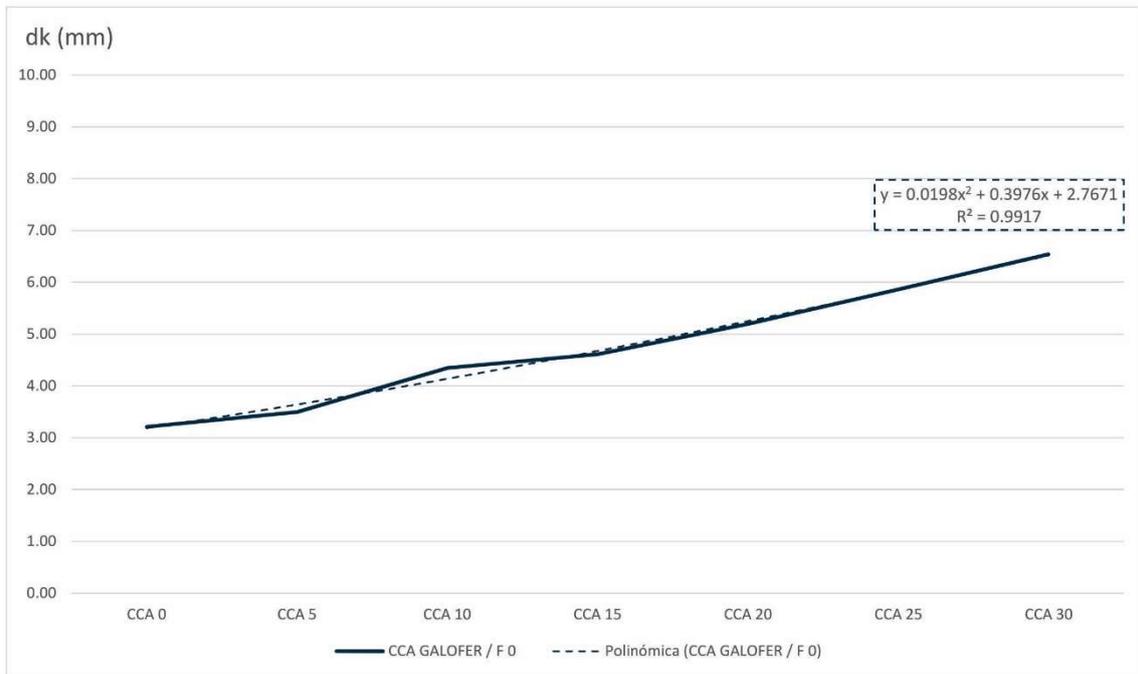
N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
2	CCA 0 / F0	3.21	0.00	0%
9	CCA 5 / F0	3.64	0.43	13%
10	CCA10 / F0	4.61	1.40	44%
11	CCA15 / F0	5.02	1.81	56%
12	CCA20 / F0	5.74	2.53	79%
13	CCA25 / F0	5.69	2.48	77%
14	CCA30 / F0	6.84	3.63	113%

La incorporación de CCA ARROZUR aumenta la profundidad de carbonatación.

La correlación entre los resultados obtenidos y la ecuación potencial es muy buena siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9661$

FICHA N° 3 CCA GALOFER / F 0

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
2	CCA 0 / F 0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
21	CCA 5 / F 0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
22	CCA 10 / F 0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
23	CCA 15 / F 0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
24	CCA 20 / F 0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
25	CCA 25 / F 0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50
26	CCA 30 / F 0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50



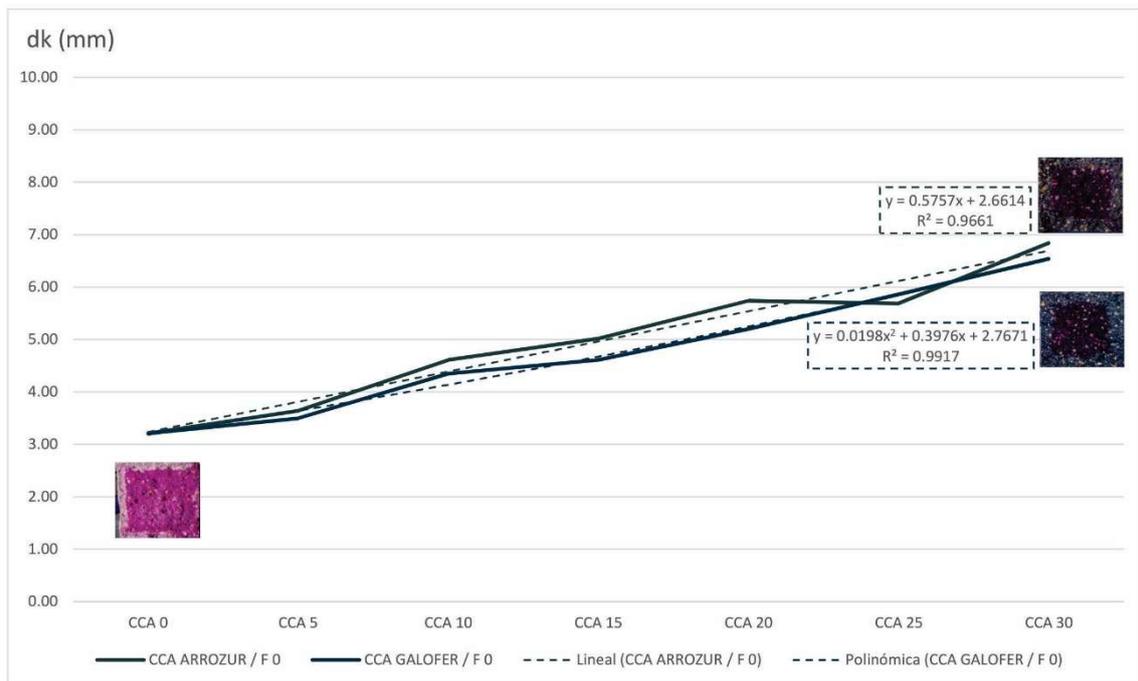
N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
2	CCA 0 / F 0	3.21	0.00	0%
21	CCA 5 / F 0	3.50	0.29	9%
22	CCA 10 / F 0	4.35	1.14	36%
23	CCA 15 / F 0	4.61	1.40	44%
24	CCA 20 / F 0	5.20	1.99	62%
25	CCA 25 / F 0	5.86	2.65	83%
26	CCA 30 / F 0	6.54	3.33	104%

La incorporación de CCA GALOFER aumenta la profundidad de carbonatación.

Existe una excelente correlación entre los resultados obtenidos y la ecuación potencial que se presenta en la gráfica ya que el coeficiente de correlación R^2 es casi 1.

FICHA N° 4 COMPARACIÓN CCA ARROZUR Y GALOFER / F 0

Nº	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
9	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
10	CCA10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
11	CCA15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
12	CCA20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
13	CCA25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50
14	CCA30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50
21	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
22	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
23	CCA10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
24	CCA15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
25	CCA20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
26	CCA25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50

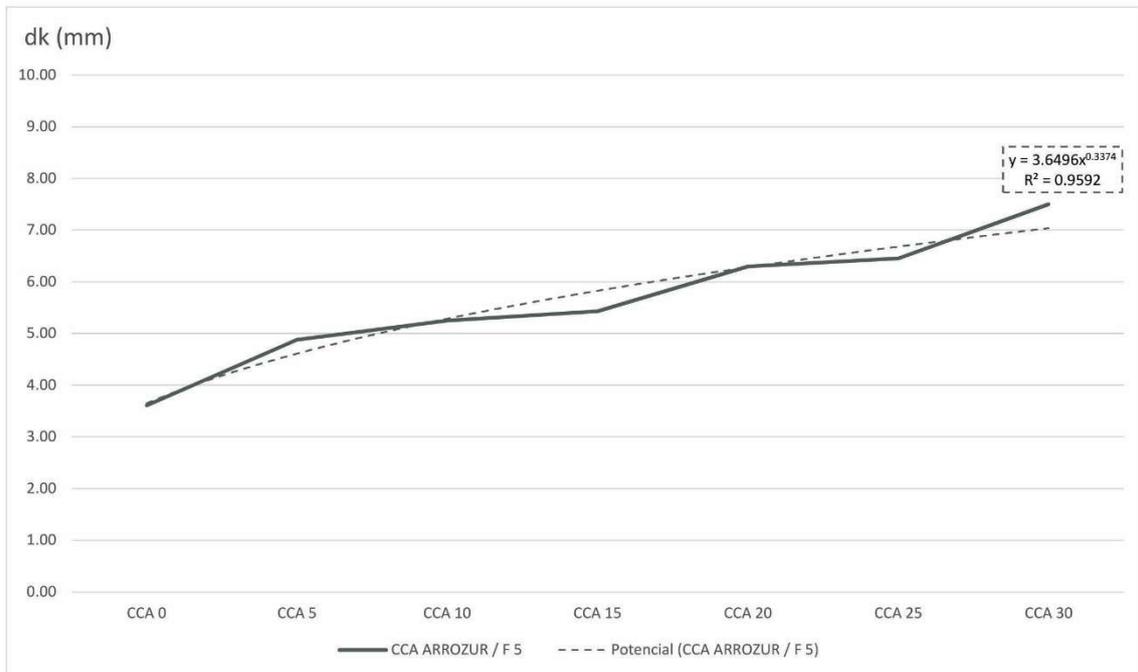


CCA ARROZUR / F 0			CCA GALOFER / F 0				
Nº	Probeta	dk (mm)	Nº	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
2	CCA 0 / F0	3.21	2	CCA 0 / F0	3.21	0.00	0%
9	CCA 5 / F0	3.64	21	CCA 5 / F0	3.50	0.14	4%
10	CCA10 / F0	4.61	22	CCA 10 / F0	4.35	0.26	6%
11	CCA15 / F0	5.02	23	CCA 15 / F0	4.61	0.41	9%
12	CCA20 / F0	5.74	24	CCA 20 / F0	5.20	0.54	10%
13	CCA25 / F0	5.69	25	CCA 25 / F0	5.86	-0.17	-3%
14	CCA30 / F0	6.84	26	CCA 30 / F0	6.54	0.30	5%

La profundidad de carbonatación es mayor en las probetas con CCA ARROZUR (sin presencia de filler calcáreo) excepto en la probeta 13. Lo anterior puede deberse a problemas de compactación.

FICHA N° 5 CCA ARROZUR / F 5

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
15	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
16	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
17	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
18	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
19	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
20	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50



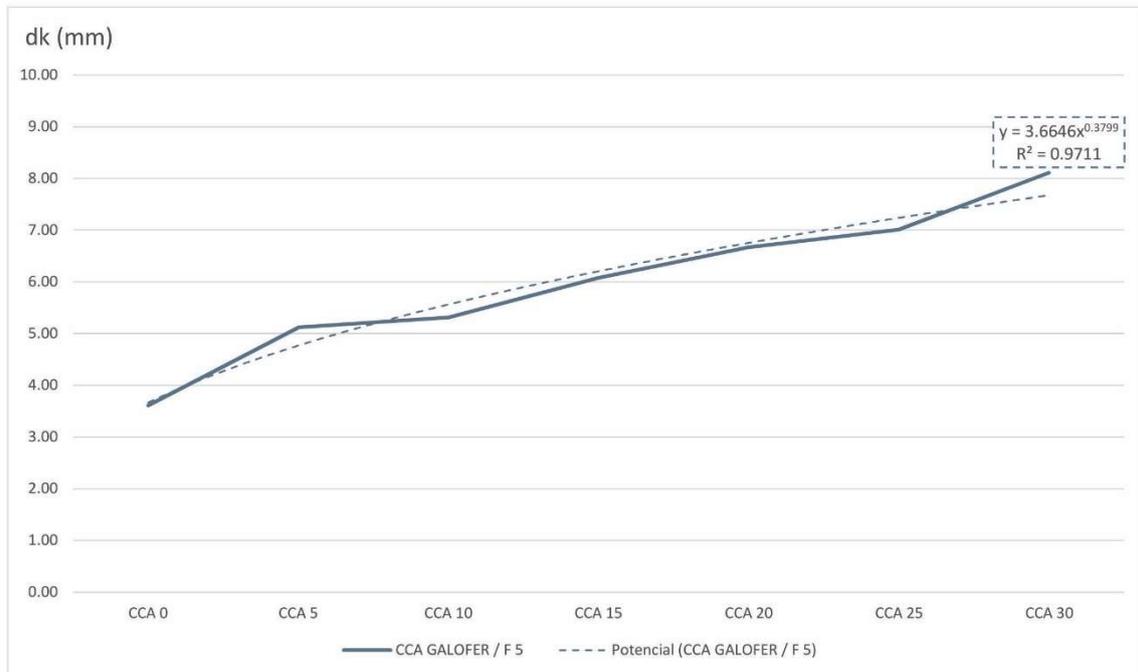
N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
3	CCA 0 / F 5	3.61	0.00	0%
15	CCA 5 / F 5	4.88	1.27	35%
16	CCA 10 / F 5	5.25	1.64	45%
17	CCA 15 / F 5	5.43	1.82	50%
18	CCA 20 / F 5	6.30	2.69	75%
19	CCA 25 / F 5	6.45	2.84	79%
20	CCA 30 / F 5	7.50	3.89	108%

La incorporación de CCA ARROZUR con mezcla de 5% de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación.

La correlación entre los resultados obtenidos y la ecuación potencial es muy buena siendo el coeficiente de correlación $R^2 = 0.9592$

FICHA N° 6 CCA GALOFER / F 5

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
27	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
28	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
29	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
30	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
31	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
32	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50



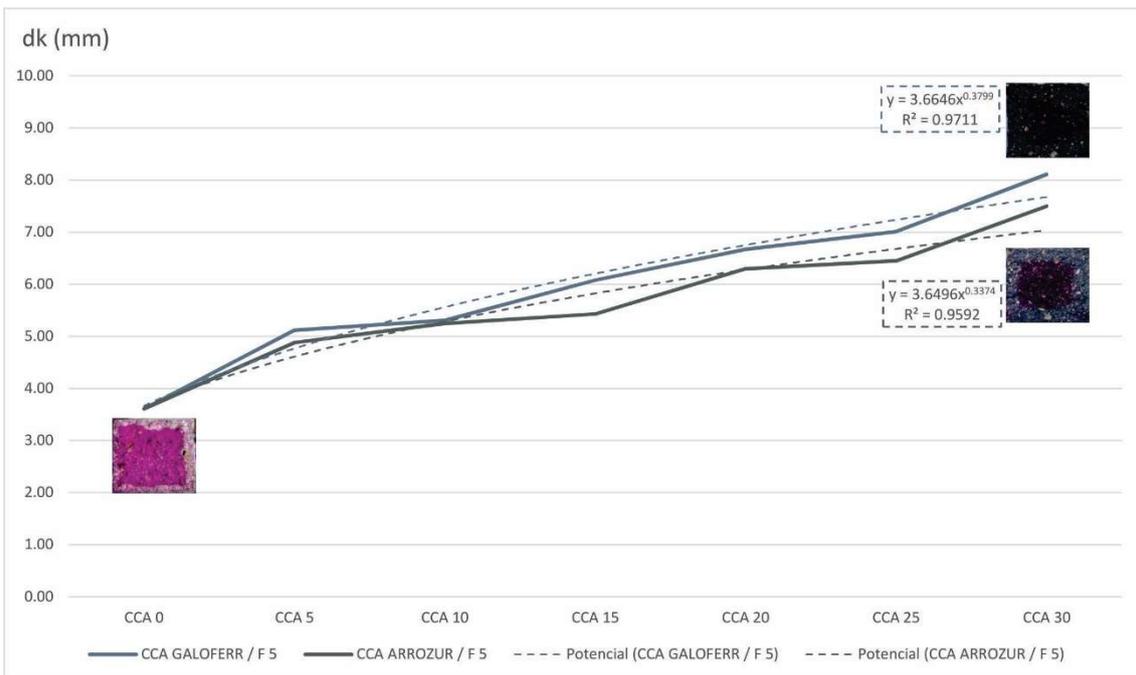
N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)
3	CCA 0 / F 5	3.61	0.00	0%
27	CCA 5 / F 5	5.12	1.51	42%
28	CCA 10 / F 5	5.31	1.70	47%
29	CCA 15 / F 5	6.08	2.47	68%
30	CCA 20 / F 5	6.67	3.06	85%
31	CCA 25 / F 5	7.01	3.40	94%
32	CCA 30 / F 5	8.11	4.50	125%

La incorporación de CCA GALOFER con mezcla de 5% de filler calcáreo aumenta la profundidad de carbonatación.

La correlación entre los resultados obtenidos y la ecuación potencial es muy buena siendo $R^2 = 0.9711$

FICHA N° 7 COMPARACIÓN CCA ARROZUR Y GALOFER / F 5

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
15	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
16	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
17	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
18	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
19	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
20	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
27	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
28	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
29	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
30	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
31	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
32	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50

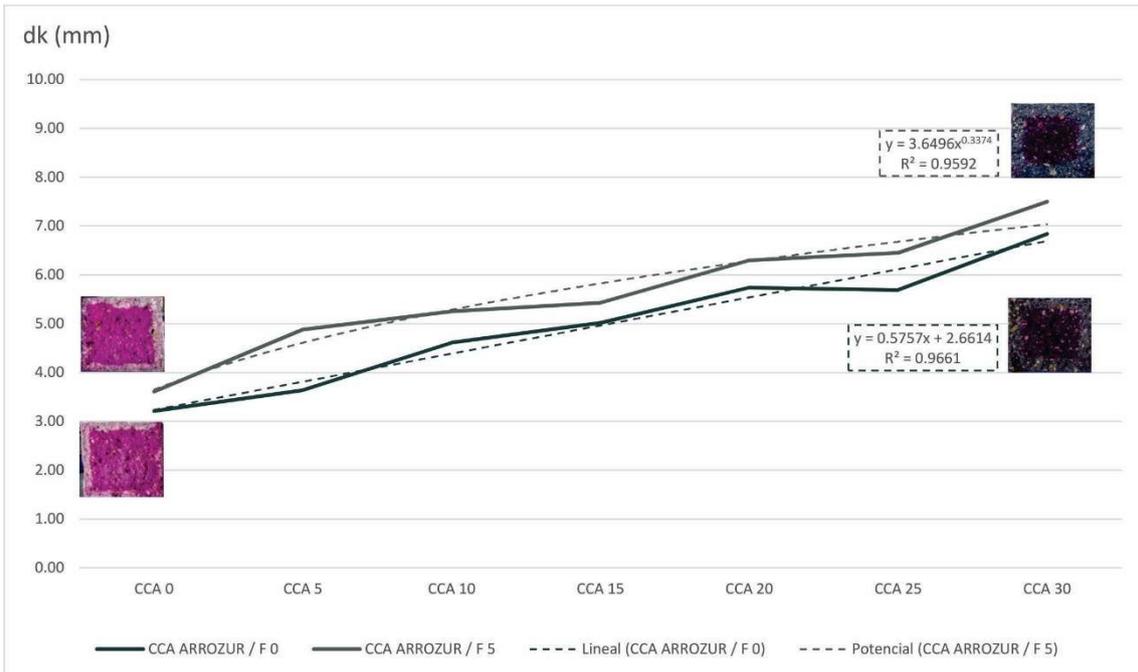


CCA ARROZUR / F 5			CCA GALOFERR / F 5					
N°	Probeta	dk (mm)	N°	Probeta	dk (mm)	Δ dk (mm)	Δ dk (%)	
3	CCA 0 / F 5	3.61	3	CCA 0 / F 5	3.61	0.00	0%	0%
15	CCA 5 / F 5	4.88	27	CCA 5 / F 5	5.12	0.24	5%	42%
16	CCA 10 / F 5	5.25	28	CCA 10 / F 5	5.31	0.06	1%	47%
17	CCA 15 / F 5	5.43	29	CCA 15 / F 5	6.08	0.65	12%	68%
18	CCA 20 / F 5	6.30	30	CCA 20 / F 5	6.67	0.37	6%	85%
19	CCA 25 / F 5	6.45	31	CCA 25 / F 5	7.01	0.56	9%	94%
20	CCA 30 / F 5	7.50	32	CCA 30 / F 5	8.11	0.61	8%	125%

Cuando se le incorpora filler calcáreo la profundidad de carbonatación tiene valores similares en piezas con bajo porcentaje de CCA. A medida que aumenta la presencia de CCA las piezas con CCA GALOFER presentan mayor profundidad de carbonatación que las piezas con CCA ARROZUR.

FICHA N° 8 CCA ARROZUR

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
9	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
10	CCA10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
11	CCA15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
12	CCA20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
13	CCA25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50
14	CCA30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
15	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
16	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
17	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
18	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
19	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
20	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50



CCA ARROZUR / F 0		
N°	Probeta	dk (mm)
2	CCA 0 / F0	3.21
9	CCA 5 / F0	3.64
10	CCA10 / F0	4.61
11	CCA15 / F0	5.02
12	CCA20 / F0	5.74
13	CCA25 / F0	5.69
14	CCA30 / F0	6.84

CCA ARROZUR / F 5		
N°	Probeta	dk (mm)
3	CCA 0 / F5	3.61
15	CCA 5 / F5	4.88
16	CCA 10 / F5	5.25
17	CCA 15 / F5	5.43
18	CCA 20 / F5	6.30
19	CCA 25 / F5	6.45
20	CCA 30 / F5	7.50

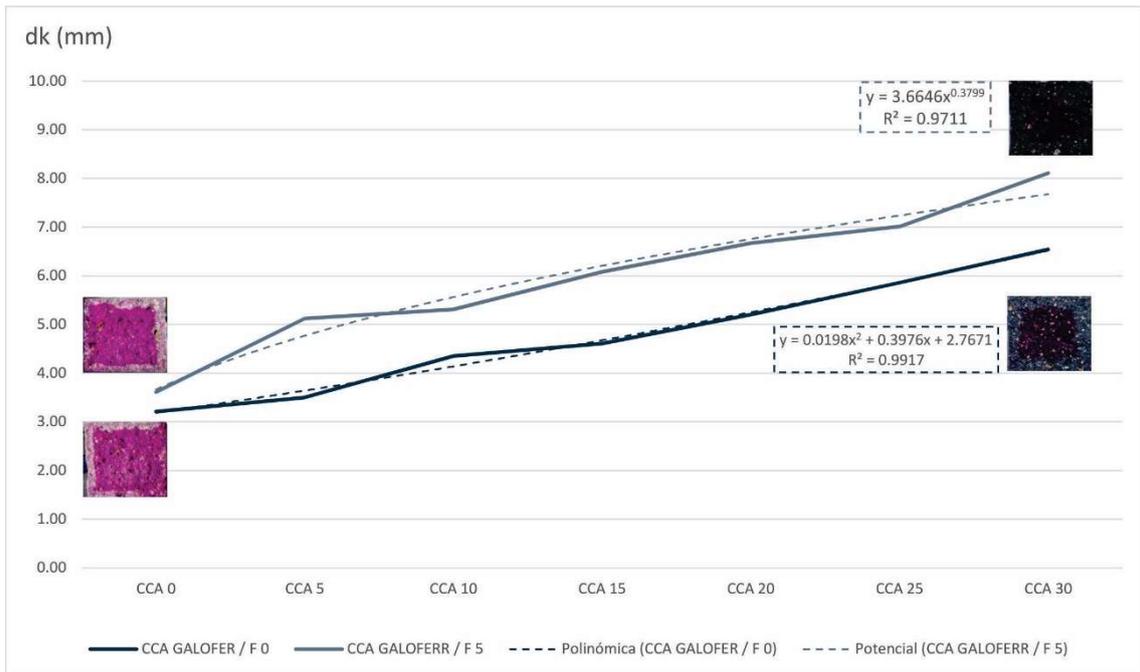
	Δdk (mm)	Δdk (%)	
	0.4	12%	12%
	1.24	34%	52%
	0.64	14%	64%
	0.41	8%	69%
	0.56	10%	96%
	0.76	13%	101%
	0.66	10%	134%

La profundidad de carbonatación aumenta con la incorporación tanto de CCA como de la mezcla de CCA con 5% de filler calcáreo.

Dicho aumento se comporta de manera proporcional entre probetas con y sin filler calcáreo, excepto para las probetas 11 y 17 donde los resultados se observan similares.

FICHA N° 9 CCA GALOFER

N°	Probeta	Arena (gr)		Agua (gr)	CP (gr)	CCA (gr)		Filler (gr)		Relación Agua/Aglom.
		Fina	Gruesa							
2	CCA 0 / F0	405.00	945.00	225.00	450.00	0.00	0%	0.00	0%	0.50
21	CCA 5 / F0	405.00	945.00	225.00	427.50	22.50	5%	0.00	0%	0.50
22	CCA10 / F0	405.00	945.00	225.00	405.00	45.00	10%	0.00	0%	0.50
23	CCA15 / F0	405.00	945.00	225.00	382.50	67.50	15%	0.00	0%	0.50
24	CCA20 / F0	405.00	945.00	225.00	360.00	90.00	20%	0.00	0%	0.50
25	CCA25 / F0	405.00	945.00	225.00	337.50	112.50	25%	0.00	0%	0.50
26	CCA30 / F0	405.00	945.00	225.00	315.00	135.00	30%	0.00	0%	0.50
3	CCA 0 / F5	405.00	945.00	225.00	427.50	0.00	0%	22.50	5%	0.50
27	CCA 5 / F5	405.00	945.00	225.00	405.00	22.50	5%	22.50	5%	0.50
28	CCA10 / F5	405.00	945.00	225.00	382.50	45.00	10%	22.50	5%	0.50
29	CCA15 / F5	405.00	945.00	225.00	360.00	67.50	15%	22.50	5%	0.50
30	CCA20 / F5	405.00	945.00	225.00	337.50	90.00	20%	22.50	5%	0.50
31	CCA25 / F5	405.00	945.00	225.00	315.00	112.50	25%	22.50	5%	0.50
32	CCA30 / F5	405.00	945.00	225.00	292.50	135.00	30%	22.50	5%	0.50



CCA GALOFER / F 0

N°	Probeta	dk (mm)
2	CCA 0 / F 0	3.21
21	CCA 5 / F 0	3.50
22	CCA 10 / F 0	4.35
23	CCA 15 / F 0	4.61
24	CCA 20 / F 0	5.20
25	CCA 25 / F 0	5.86
26	CCA 30 / F 0	6.54

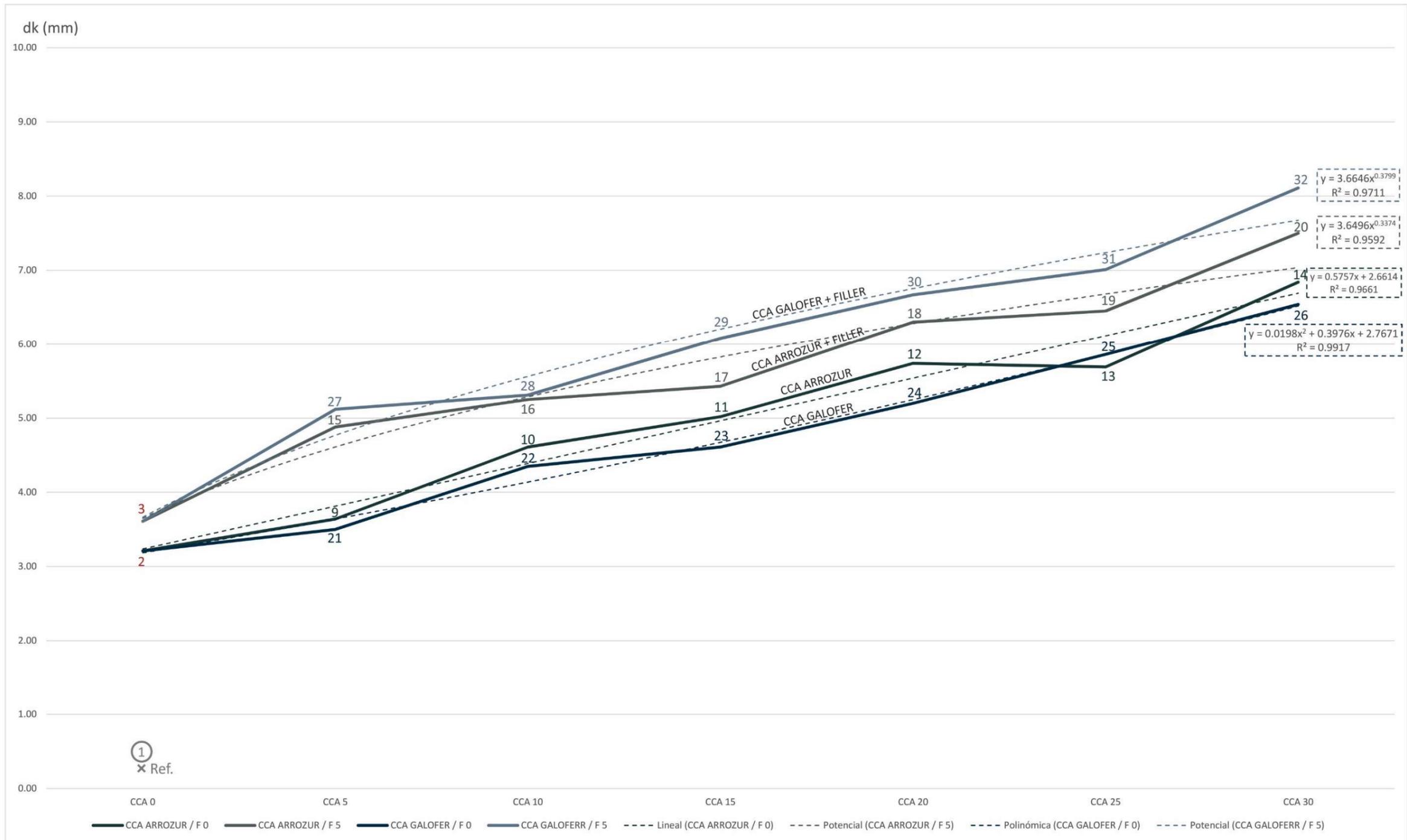
CCA GALOFERR / F 5

N°	Probeta	dk (mm)
3	CCA 0 / F 5	3.61
27	CCA 5 / F 5	5.12
28	CCA 10 / F 5	5.31
29	CCA 15 / F 5	6.08
30	CCA 20 / F 5	6.67
31	CCA 25 / F 5	7.01
32	CCA 30 / F 5	8.11

	Δ dk (mm)	Δ dk (%)	
	0.40	12%	12%
	1.62	46%	60%
	0.96	22%	65%
	1.47	32%	89%
	1.47	28%	108%
	1.15	20%	118%
	1.57	24%	153%

La profundidad de carbonatación aumenta con la incorporación tanto de CCA como de la mezcla de CCA con 5% de filler calcáreo.

Dicho aumento se comporta de manera proporcional entre probetas con y sin filler calcáreo excepto para las probetas 22 y 28 donde los resultados se observan similares.



dk (mm)		
1	Ref.	0.27

CCA ARROZUR / F 0		
N°	Probeta	dk (mm)
2	CCA 0 / F 0	3.21
9	CCA 5 / F 0	3.64
10	CCA 10 / F 0	4.61
11	CCA 15 / F 0	5.02
12	CCA 20 / F 0	5.74
13	CCA 25 / F 0	5.69
14	CCA 30 / F 0	6.84

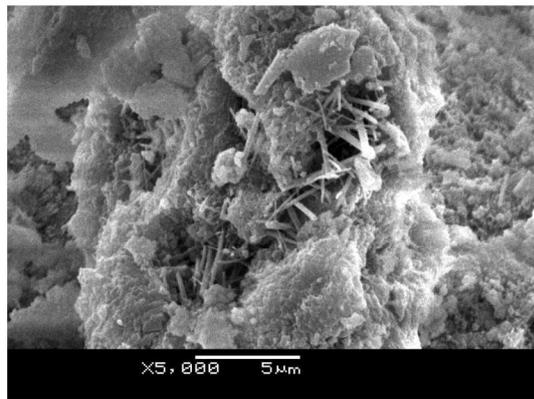
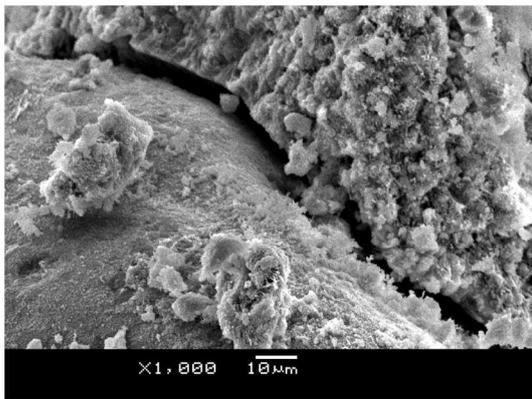
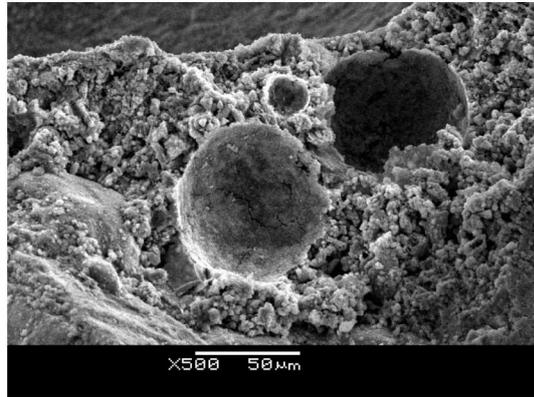
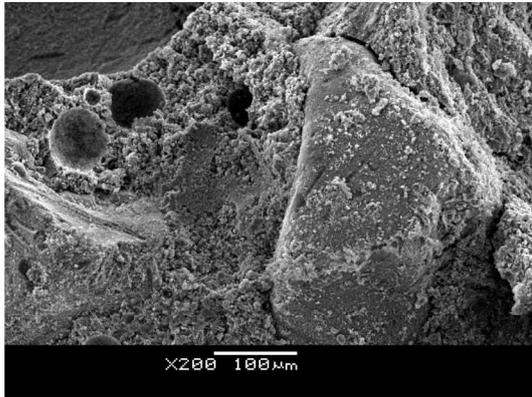
CCA ARROZUR / F 5		
N°	Probeta	dk (mm)
3	CCA 0 / F 5	3.61
15	CCA 5 / F 5	4.88
16	CCA 10 / F 5	5.25
17	CCA 15 / F 5	5.43
18	CCA 20 / F 5	6.30
19	CCA 25 / F 5	6.45
20	CCA 30 / F 5	7.50

CCA GALOFER / F 0		
N°	Probeta	dk (mm)
2	CCA 0 / F 0	3.21
21	CCA 5 / F 0	3.50
22	CCA 10 / F 0	4.35
23	CCA 15 / F 0	4.61
24	CCA 20 / F 0	5.20
25	CCA 25 / F 0	5.86
26	CCA 30 / F 0	6.54

CCA GALOFERR / F 5		
N°	Probeta	dk (mm)
3	CCA 0 / F 5	3.61
27	CCA 5 / F 5	5.12
28	CCA 10 / F 5	5.31
29	CCA 15 / F 5	6.08
30	CCA 20 / F 5	6.67
31	CCA 25 / F 5	7.01
32	CCA 30 / F 5	8.11

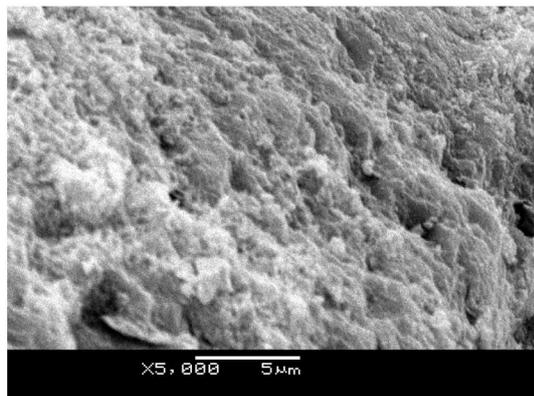
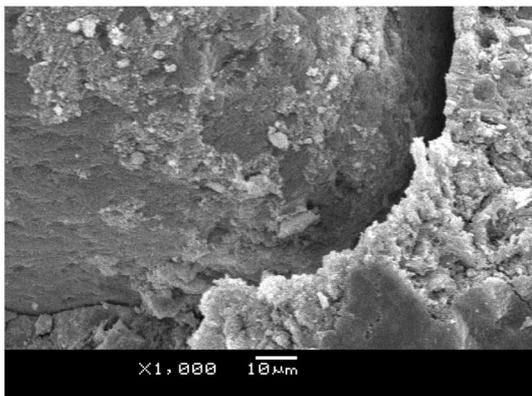
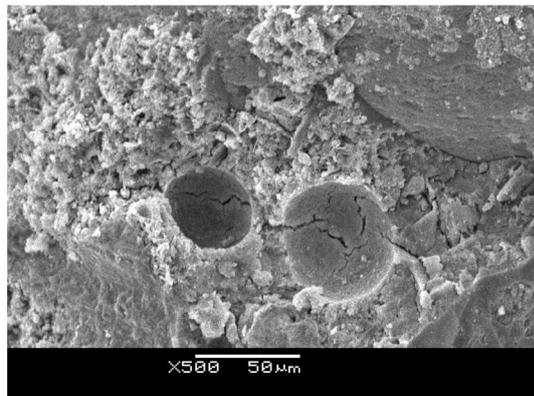
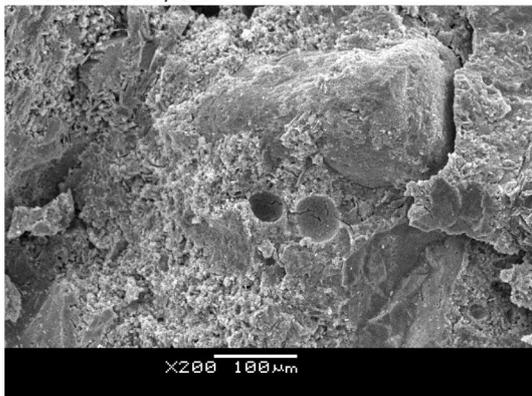
ANEXO E – MEB

Probeta de referencia CCA 0 / F 0

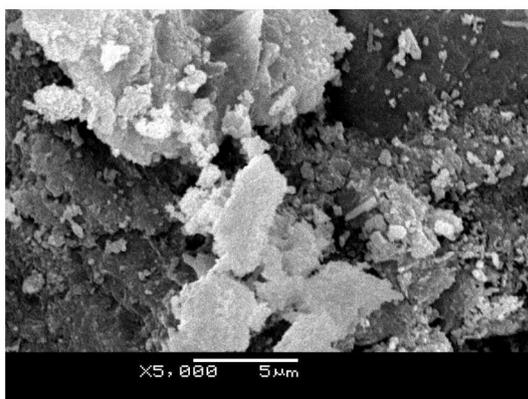
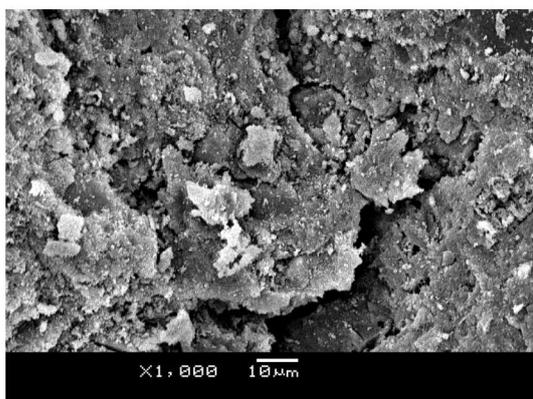
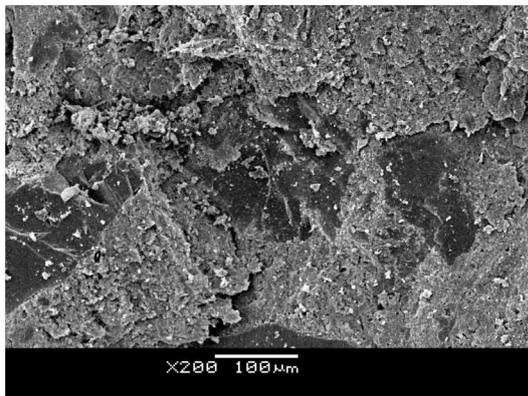
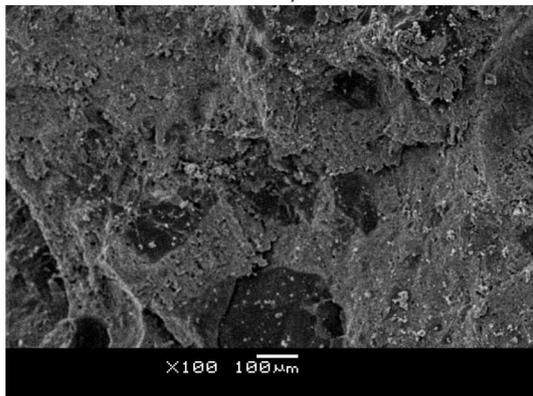


116

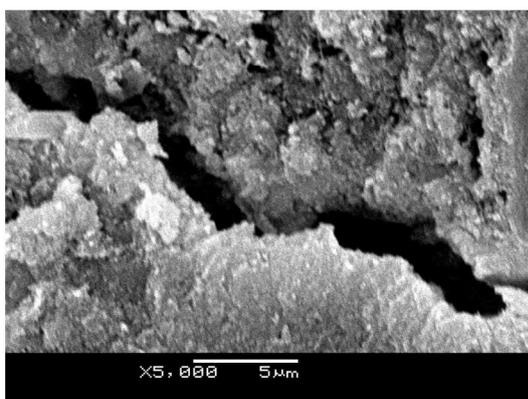
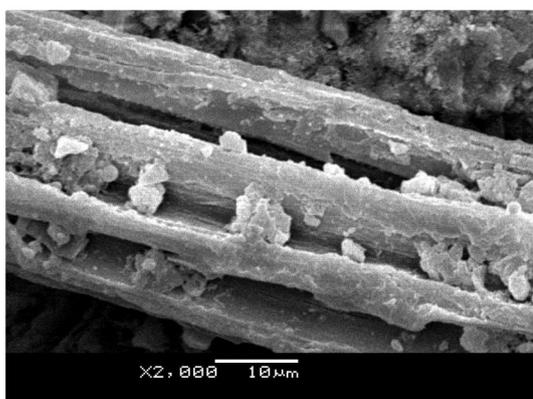
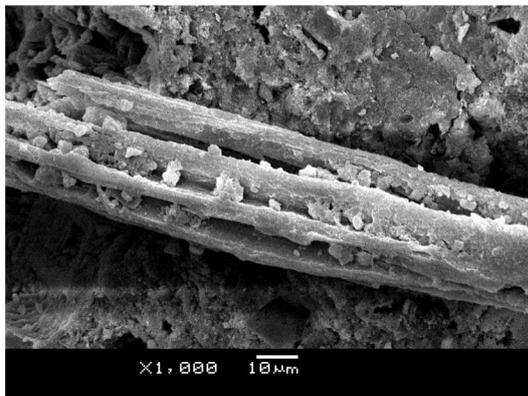
Probeta CCA 0 / F 0



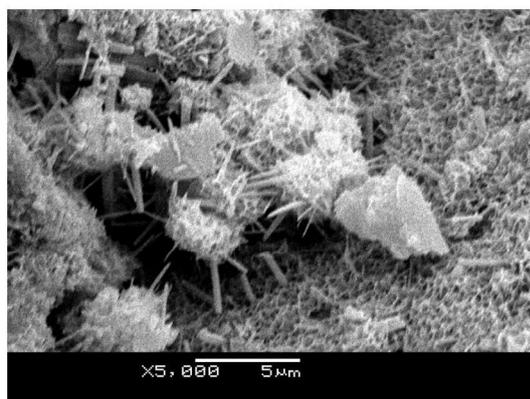
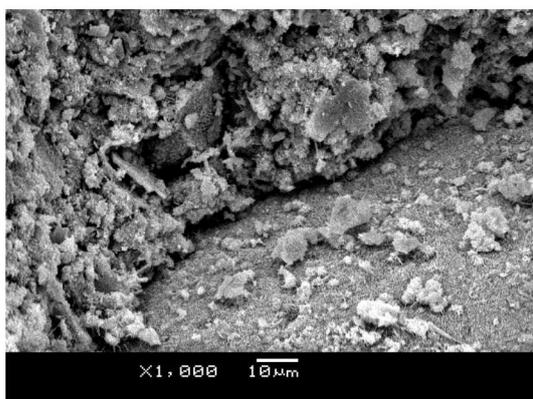
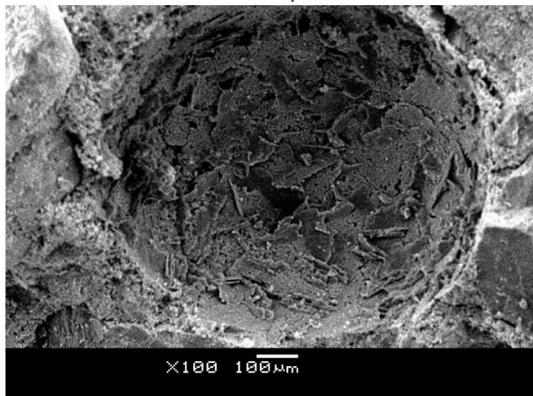
Probeta CCA ARROZUR 10 / F 0



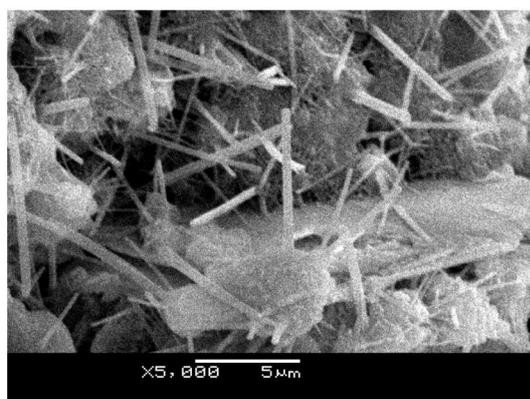
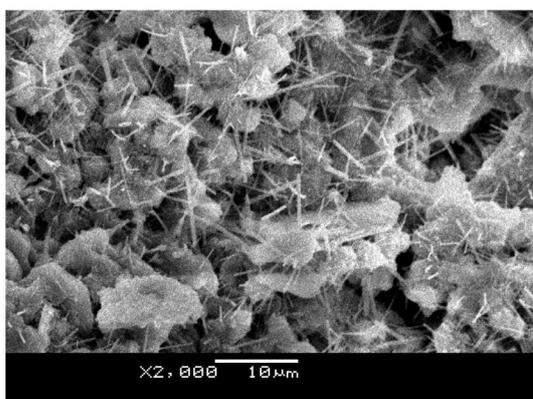
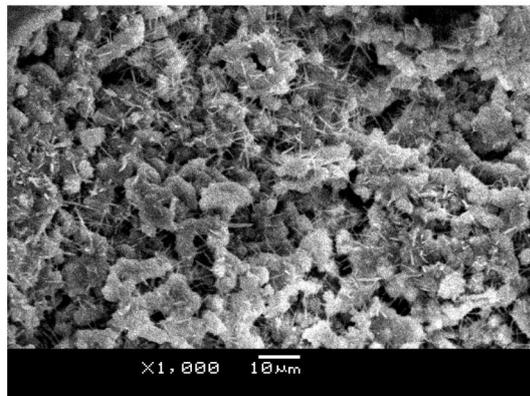
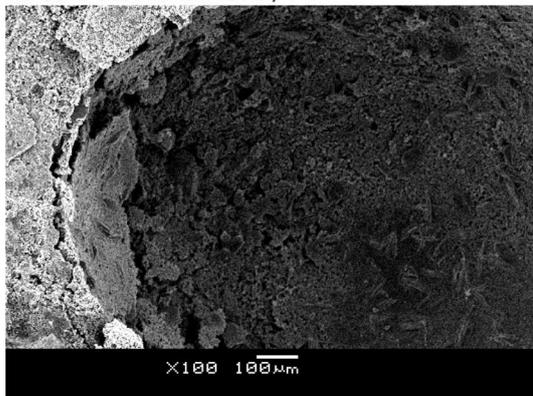
Probeta CCA ARROZUR 25 / F 0



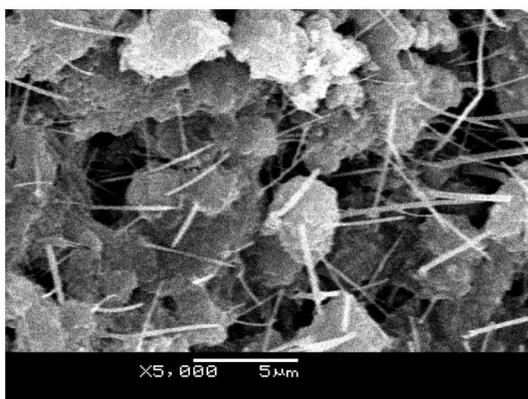
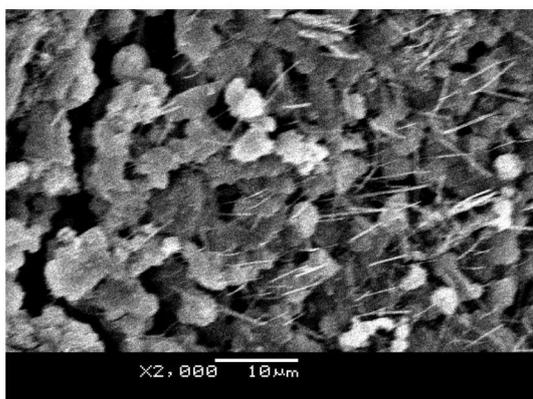
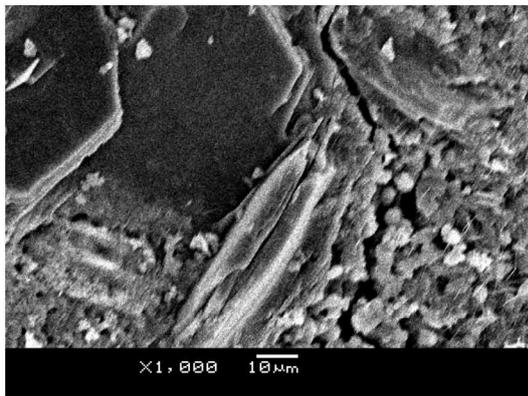
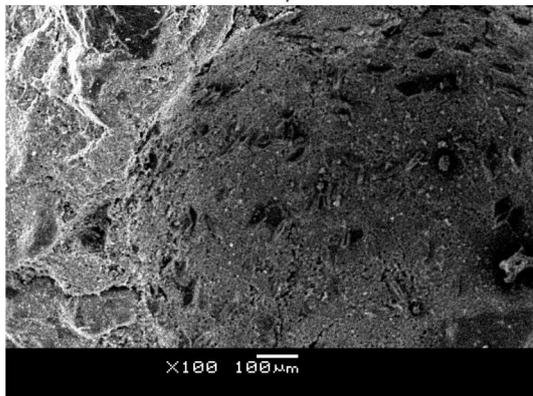
Probeta CCA ARROZUR 10 / F 5



Probeta CCA GALOFER 5 / F 5



Probeta CCA GALOFER 10 / F 5



Probeta CCA GALOFER 20 / F 5

