

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EFFECTO SINÉRGICO DE LA CENIZA VOLANTE CON MICRO POLVO DE
CARBONATO DE CALCIO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
DURABILIDAD DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**

Por

JUAN ANTONIO DE LÉON ESQUIVEL

Directores de Tesis

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Ch.E. DALE PATRICK BENTZ

**Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS con
orientación en Materiales de Construcción.**

Noviembre de 2014



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirección de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil de la UANL
Presente.-

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente, le comunico que el **ING. JUAN ANTONIO DE LEÓN ESQUIVEL**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado **“Efecto sinérgico de la ceniza volante con micro-polvo de carbonato de calcio para el mejoramiento de la durabilidad de concretos autocompactables”**, por lo que para cumplir con los requisitos que exige el reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución, de la manera más atenta solicito su intervención para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del examen de grado del Ing. de León Esquivel.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y le envío un afectuoso saludo.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Ciudad Universitaria, 17 de octubre del 2014

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

Director de Tesis



*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66451
Tel:1442 4400 Fax:1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>



DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirección de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil de la UANL
Presente.-

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente, le comunico que el **ING. JUAN ANTONIO DE LEÓN ESQUIVEL**, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado **“Efecto sinérgico de la ceniza volante con micro-polvo de carbonato de calcio para el mejoramiento de la durabilidad de concretos autocompactables”**, por lo que para cumplir con los requisitos que exige el reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución, de la manera más atenta solicito su intervención para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del examen de grado del Ing. de León Esquivel.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y le envío un afectuoso saludo.

Atentamente
20 Octubre, 2014

DALE P. BENTZ
Chemical Engineer, NIST
Revisor de Tesis



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado EVALUADOR de la Tesis “EFECTO SINÉRGICO DE LA CENIZA VOLANTE CON MICROPOLVO DE CARBONATO DE CALCIO, PARA EL MEJORAMIENTO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES”, que presenta el **Ing. Juan Antonio de León Esquivel**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 24 de Octubre de 2014

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
EVALUADOR

c.c.p. Archivo



“Educación de clase mundial,
un compromiso social”

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66451
Tel: 14424400 Fax: 14424443
<http://www.fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

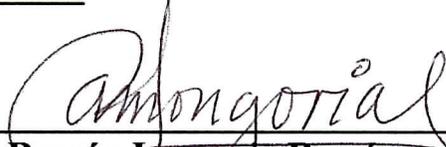
COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: JUAN ANTONIO DE LEÓN ESQUIVEL

Tema de la tesis: EFECTO SINÉRGICO DE LA CENIZA VOLANTE
CON MICROPOLVO DE CARBONATO DE CALCIO, PARA EL MEJO-
RAMIENTO DE LA DURABILIDAD DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA
Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico,
metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales: (NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió: 
Arq. Ramón Longoria Ramírez


DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de Estudios de Posgrado



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE POSGRADO

Ciudad Universitaria, a 27 de OCTUBRE de 2014.



AGRADECIMIENTOS

A *Dios* por haberme brindado la oportunidad de vivir esta experiencia y por haberme permitido terminar esta etapa importante de mi vida.

A mis padres, *Adela Esquivel Quintero* y *Juan Antonio de León Rdz.*, por haberme apoyado incondicionalmente no solo en ésta, sino en todas las etapas de mi vida. Muchas gracias por estar siempre que los he necesitado y por todo el amor que sólo ustedes saben brindar.

A mis hermanas, *María de León* y *Alejandra de León*, por creer en mí y por haber sido mi primera escuela. Muchas gracias por todas las enseñanzas y por toda la ayuda que me han brindado.

A mis sobrinos *Amy Sofía* e *Ian Roel*, por brindar luz y alegría a nuestra familia

A toda la familia de León Rodríguez y Esquivel Quintero, por todo su apoyo; pero sobre todo, a mis abuelos *Vicenta Quintero*, *Modesto Esquivel*, *María Rodríguez[†]*, *Eliezer de León[†]*, por sus enseñanzas y consejos.

A mi asesor de tesis, *Dr. Alejandro Durán Herrera*, por apoyarme y por todas sus enseñanzas. Muchas gracias por su paciencia, confianza y apoyo, que me permitieron llegar a terminar este proyecto.

A mi asesor externo, *Dale P. Bentz*, por brindarme su apoyo y asesoría. Muchas gracias por toda su ayuda durante la realización de este proyecto.

A *Jaime González*, *José Guajardo*, *Francisco Anguiano* y *Ricardo Cavazos*, quienes son como mis hermanos. Muchas gracias por todo su apoyo y sobre todo por estar siempre cuando más los he necesitado.

A mis profesores, por todas sus enseñanzas y por ayudarme en mi crecimiento profesional.

A todo el personal del departamento de tecnología del concreto, a quienes he tenido el honor de conocer y de trabajar con ellos: *Iliana Garza*, *Erick Villanueva*, *Erick Cervantes*, *Jorge Rivera*, *Rogelio Dávila*, *Martha Rivera*, *Marcos Balderas*, *Catarino Ortiz*, *Juan C. “Jony” Sánchez*, *Alberto “Beto” Rubio* y *Rubén Orozco*. Muchas gracias por todo su apoyo y enseñanzas y sobre todo, por permitirme ser parte de la familia de este departamento.

A *Rubén Alvarado*, por asistirme en los ensayos mecánicos de los especímenes de esta investigación.

Al laboratorio de materiales de construcción, en especial, al *Sr. Gumaro Tovar* y al *Dr. Antonio Saldívar*, por ayudarme con las pruebas realizadas en esta investigación.

Al personal del laboratorio de Eco-materiales por ayudarme con la caracterización de mis materiales.

A mis compañeros y amigos quienes me han ayudado tanto personalmente como para la realización de este proyecto: *Daniel Gálvez, Carlos Vaquero, Ana Ugartechea, Joana K. Campos, Miguel Flores Jarquín, Guillermo Hernández, Carmen Moreno, Lucero Serrato, Rafael Garza, Alan Luna* y a todos los que me han brindado su ayuda.

A los alumnos del Servicio Social y el Verano de Investigación: *Fernanda Gálvez, Karla Jáquez, Estefanía Flores, Dara Castañeda, Hernán Cortez, Erick Espino, Federico Díaz Alejandro Narro, Luis Campos, Jesús Flores Bojórquez, Yazid Gómez, Neil Pachicano* y a los “chavos” del área académica del departamento de tecnología del concreto, quienes me ayudaron en la realización de las pruebas de esta investigación.

Al *Ing. Filiberto Marín* y a la *Ing. Alma Reyes*, por haberme facilitado los aditivos utilizados en esta investigación.

A *David Carr* y *Francisco Pazos* de *OMYA* y al *Ing. Israel Olivares* de *Representaciones Técnicas*, por el donativo del micro-polvo de carbonato de calcio.

A la *Comisión Federal de Electricidad*, por el donativo de la ceniza volante utilizada en esta investigación.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*, por la ayuda económica brindada durante mis estudios de maestría.

Y a todos aquellos que me apoyaron para la realización de este proyecto. Muchas gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, por todo su apoyo y comprensión.

A mis hermanas, por su ayuda y sus consejos.

A mis sobrinos, por brindarme alegría.

A mi familia y amigos, por estar siempre presentes.

A mis asesores y profesores, por confiar siempre en mí y por sus enseñanzas.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Concreto autocompactable.....	2
1.1.2. Aditivos minerales en el concreto autocompactable.....	5
1.2. Marco teórico	7
1.2.1. Carbonatación	7
1.2.2. Permeabilidad a los iones cloro	12
1.2.3. Resistividad eléctrica	15
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	19
2.1. Carbonatación	20
2.1.1. Efecto de la ceniza volante en la carbonatación	20
2.1.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la carbonatación	21
2.1.3. Efecto de las combinaciones de CV y polvo de CaCO ₃ en la carbonatación .	22
2.2. Permeabilidad a los iones cloro	23
2.2.1. Efecto de la ceniza volante en la permeabilidad a los iones cloro.....	23
2.2.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la permeabilidad a los iones cloro	25
2.2.3. Efecto de las combinaciones de CV y polvo de CaCO ₃ en la permeabilidad a los iones cloro	26
2.3. Resistividad eléctrica	27
2.3.1. Efecto de la ceniza volante en la resistividad eléctrica.....	27
2.3.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la resistividad eléctrica.....	28
2.4. Uso de polvo de caliza para la aceleración de la hidratación en mezclas con altos volúmenes de ceniza volante	28
CAPÍTULO 3 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	31
3.1. Objetivos	31
3.1.1. Objetivo general.....	31
3.1.2. Objetivos particulares	31
3.2. Justificación	32
CAPÍTULO 4 MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN	33

4.1. Descripción de Materiales:	33
4.1.1. Cemento Portland.....	33
4.1.2. Ceniza volante.....	34
4.1.3. Micro-polvo de carbonato de calcio	35
4.1.4. Agregados	35
4.1.5. Aditivos químicos	37
4.2. Caracterización de materiales	39
4.2.1. Cementantes y micro polvo de carbonato de calcio.....	39
4.2.2.- Agregados.....	42
4.2.3. Aditivos químicos	42
CAPÍTULO 5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	43
5.1. Concreto autocompactable.....	43
5.2. Mortero equivalente a concreto	44
5.3. Matriz experimental	45
5.4. Metodología experimental	48
5.4.1. Propiedades en estado fresco	48
5.4.2. Estabilidad volumétrica	51
5.4.3. Propiedades en estado endurecido	52
CAPÍTULO 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1.- Caracterización de materiales.....	57
6.1.1.- Cementantes y micro polvo de carbonato de calcio (Polvos).....	57
6.1.2.- Agregados.....	65
6.1.3.- Aditivos químicos.....	66
6.2. Resultados experimentales.....	67
6.2.1. Propiedades en estado fresco	67
6.2.2. Estabilidad volumétrica	74
6.2.3. Propiedades en estado endurecido	81
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	96
7.1. Propiedades en estado fresco	96
7.1.1. Fluidéz.....	96
7.1.2. Masa unitaria.....	96
7.1.3. Contenido de aire	97
7.1.4. Tiempos de Fraguado.....	97

7.2. Estabilidad volumétrica	97
7.2.1. Deformación autógena	97
7.2.2. Contracción por secado.....	98
7.3. Propiedades en estado endurecido	98
7.3.1. Resistencia a la compresión	98
7.3.2. Indicadores de durabilidad.....	99
CAPÍTULO 8 RECOMENDACIONES	101
CAPÍTULO 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
ANEXO A CÁLCULO DE MORTERO EQUIVALENTE A CONCRETO	113
ANEXO B PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO	116
B.1. Proceso de mezclado del concreto autocompactable	116
B.2. Proceso de mezclado de los morteros	117
ANEXO C IMÁGENES DE CARBONATACIÓN.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

<i>Tabla 5.1 - Proporcionamiento y propiedades del Concreto Autocompactable de referencia</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5.2 - Proporcionamiento del mortero de referencia calculado a partir del concreto autocompactable por el método de mortero equivalente a concreto.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 5.3 - Matriz experimental, porcentajes con respecto al volumen de polvos.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5.4 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie A</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5.5 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie B</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 5.6 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie C.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 6.1 - Densidad de los materiales cementantes y el micro-polvo de carbonato de calcio.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6.2 - Tamaños de partícula por los que pasan 10%, 50% y 90% del volumen total del material.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6.3 - Composición química de los materiales cementantes y micro-polvo de carbonato de calcio</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 6.4 - Nomenclatura y composición química de las fases minerales</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 6.5 - Índice de actividad a la resistencia de la ceniza volante</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 6.6 - Densidad y absorción de los agregados fino y grueso</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 6.7 - Análisis granulométrico del agregado fino</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 6.8 - Análisis granulométrico del agregado grueso.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 6.9 - Densidad y contenido de sólidos de los aditivos químicos</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 6.10 - Propiedades en estado fresco para los morteros estudiados</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 6.11 - Deformación autógena total de las mezclas estudiadas</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 6.12 - Contracción por secado a los 28 días de las mezclas estudiadas.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 6.13 - Reducción de la permeabilidad a los iones cloro, a los 56 días, con relación a los 28 días....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla A.1 - Cálculo del área superficial del agregado fino, para un contenido de 1136.3 kg/m³</i>	<i>115</i>
<i>Tabla A.2 - Cálculo del área superficial del agregado grueso, para un contenido de 693.7 kg/m³</i>	<i>115</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 2.1 - Efecto de la cantidad de ceniza volante y el polvo de carbonato de calcio en la cantidad de hidróxido de calcio de la mezcla (K. De Weerd, 2011).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4.1 - Cemento Portland Ordinario (CPO 40).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.2 - Ceniza volante de la CFE, Nava, Coahuila</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.3 – Micro-polvo de carbonato de calcio (Omyacarb UF-FL).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.4 - Agregados de caliza triturada de la región</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.5 – Aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante “Plastol Precast”</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.6 - Aditivo modificador de viscosidad “Visctrol”</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.7 - Analizador de difracción láser MICROTRAC para la obtención del DTP</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.8 - Difractómetro de rayos "X" Bruker D8 Advance, para la medición de fases minerales</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.9 - Microscopio Electrónico de Barrido y equipo para Espectroscopía de Dispersión de Energía</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.1- Batidora planetaria UNIVEX (izq.) y homogeneizadora de tipo pantalón MICRON (der.)</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.2 - Medición de fluidez de morteros</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.3 - Medición de la masa unitaria de morteros</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.4- Medición de tiempos de fraguado de acuerdo con ASTM C-403.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.5- Medición de deformación autógena de acuerdo con ASTM C-1698.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.6 - Medición de retracción por secado de acuerdo con ASTM C-596</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.7 - Máquina universal INSTRON (izq.) y ensayo a compresión de acuerdo a ASTM C-109 (der.)</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.8 - Cámara de carbonatación acelerada (izq.) y medición de profundidad de carbonatación (der.)</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.9 - Apartato PROOVE´it (izq.) y celdas (der.) para la prueba RCPT según ASTM C-1202.....</i>	<i>54</i>

<i>Figura 5.10 - Medidor de resistividad Resipod PROCEQ (izq.) y medición de resistividad eléctrica superficial (der.).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 6.1 - Distribución de tamaño de partículas de CPO 40, CV y CaCO₃</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6.2 - Difracción de rayos "X" del cemento Portland ordinario.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.3 - Difracción de rayos "X" de la ceniza volante</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.4 - Difracción de rayos "X" del micro-polvo de carbonato de calcio</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.5 - Micrografía del cemento Portland ordinario, con aumento: a) ×200, b) ×1000, c) ×2000</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.6 - Micrografía de la ceniza volante, con aumento: a) ×200, b) ×1000, c) ×2000</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.7 - Micrografía del micro-polvo de carbonato de calcio, con aumento: a) ×2000, b) ×12000, c) ×25000</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.8 - Composición elemental del cemento Portland ordinario por EDS.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 6.9 - Composición elemental de la ceniza volante por EDS.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 6.10 - Composición elemental del micro-polvo de carbonato de calcio por EDS.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 6.11 - Efecto de las sustituciones de micro-polvo de CaCO₃ en la masa unitaria medida.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 6.12 - Efecto de las sustituciones de micro polvo de CaCO₃ en el contenido de aire</i>	<i>70</i>
<i>Figura 6. 13 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie A</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6.14 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie B</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6. 15 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie C.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.16 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Referencia y las series A, B y C.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 6.17 - Deformación autógena de la Serie A</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.18 - Deformación autógena de la Serie B</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.19 - Deformación autógena de la Serie C</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.20 - Contracción por secado de la Serie A.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.21 - Contracción por secado de la Serie B.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.22 - Contracción por secado de la Serie C</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.23 - Resistencias a la compresión de las mezclas estudiadas</i>	<i>82</i>

<i>Figura 6.24 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie A curados por 28 días</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.25 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie B curados por 28 días</i>	<i>84</i>
<i>Figura 6.26 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie C curados por 28 días</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.27 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie A curados por 56 días</i>	<i>85</i>
<i>Figura 6.28 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie B curados por 56 días</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.29 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie C curados por 56 días</i>	<i>86</i>
<i>Figura 6.30 - Profundidad de carbonatación Vs la raíz cuadrada del tiempo (años)</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.31. Correlación entre el coeficiente de difusión de carbonatación y la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 6.32 - Carga total pasada en la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 6.33 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie A</i>	<i>93</i>
<i>Figura 6.34 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie B</i>	<i>94</i>
<i>Figura 6.35 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie C</i>	<i>94</i>
<i>Figura 6.36 - Correlación entre la carga total pasada y la resistividad eléctrica superficial de las mezclas estudiadas.....</i>	<i>95</i>

RESUMEN

El uso del concreto autocompactable ha ido incrementando en la industria de la construcción, como reemplazo del concreto vibrado convencional, desde su primer uso en Japón a finales de los años ochenta. Sin embargo, aún existen algunas dudas sobre la durabilidad de los concretos autocompactables comparados con los concretos vibrados convencionales. Una de las diferencias más importantes entre el concreto autocompactable y el concreto vibrado convencional es la incorporación de aditivos minerales en el primero. Estos aditivos minerales se utilizan para mejorar algunas propiedades en estado fresco y endurecido del concreto autocompactable, así como para reemplazar parte de los altos contenidos de cemento Portland que tienen estos concretos. En este estudio se investigó el efecto de la sustitución de cemento Portland por dos aditivos minerales (ceniza volante y un micro-polvo de carbonato de calcio con un tamaño promedio de partícula de $0.7 \mu\text{m}$), en indicadores de durabilidad de los concretos autocompactables, tales como: carbonatación, permeabilidad a los iones cloro y resistividad eléctrica, así como en otras propiedades en estado fresco y endurecido. Con esta investigación se lograron determinar las combinaciones óptimas de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio en los indicadores de durabilidad previamente mencionados.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Desde su primer uso en Japón a finales de los años ochenta, la utilización del concreto autocompactable ha ido incrementando en la industria de la construcción como reemplazo del concreto vibrado convencional, esto es debido a sus grandes ventajas como la reducción de mano de obra, la reducción de costos y la facilidad de colado en secciones altamente reforzadas, entre otras ^[1].

Sin embargo, existen algunas dudas sobre la durabilidad de los concretos autocompactables comparados con los concretos vibrados convencionales, especialmente en términos de durabilidad físico-química ^[2]. Por otra parte, una de las más importantes diferencias entre el concreto autocompactable y el concreto vibrado convencional es la incorporación de aditivos minerales utilizados ya sea para reemplazar una parte de sus altos contenidos de cemento Portland o para mejorar algunas propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Estos aditivos minerales también pueden mejorar el empaquetamiento de partículas y disminuir la permeabilidad del concreto, aumentando así su durabilidad ^[3]. Por esta razón, en el presente estudio se investigó el efecto de la sustitución del cemento Portland por dos aditivos minerales (polvos): ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio, en la durabilidad de los concretos autocompactables. Los aportes en la durabilidad del concreto con el uso de estos materiales se analizarán más adelante.

1.1.1. Concreto autocompactable

1.1.1.1. Definición

El ACI 237 define al concreto autocompactable como un concreto altamente fluido, sin segregación, capaz de extenderse, llenar las cimbras y encapsular al acero de refuerzo sin la ayuda de ninguna consolidación mecánica ^[4].

1.1.1.2. Historia

El uso del concreto autocompactable ha sido ampliamente aceptado en Japón desde finales de los años ochenta. Inicialmente se desarrolló para asegurar la adecuada consolidación en aplicaciones donde se necesitaba un completo llenado de los elementos estructurales para asegurar su durabilidad. Posteriormente se utilizó para facilitar las operaciones de construcción y reducir los tiempos y los costos de las obras. Otro de los principales factores que influenciaron su desarrollo fue la reducción en el número de operadores capacitados que sufría en los años ochenta la industria de la construcción en Japón. Después del desarrollo del prototipo del concreto autocompactable en Japón, se llevaron a cabo numerosas investigaciones que tuvieron como resultado el uso de este concreto en aplicaciones estructurales. Hoy en día se sigue utilizando el concreto en aplicaciones que van desde su uso en elementos prefabricados, hasta construcciones de elementos estructurales de grandes dimensiones ^[1].

1.1.1.3. Composición del concreto autocompactable

Para poder lograr la suficiente fluidez en estos concretos, sin aumentar el contenido de agua, se deben utilizar aditivos superfluidificantes, que proveen a las partículas del cemento con cargas eléctricas iguales, creando una repulsión electrostática y que,

además, poseen cadenas poliméricas que crean una barrera por la que otras partículas no pueden cruzar fácilmente.

Sin embargo, la adición de aditivos superfluidificantes no es suficiente para crear un concreto autocompactable, debido a la gran cantidad de agregado grueso presente en el concreto tradicional, cuyas partículas pueden causar bloqueos, al fluir a través de algún espaciamiento estrecho. Este es un aspecto que debe evitarse en el concreto autocompactable; por esto también se debe reducir el contenido de agregado grueso en las mezclas de concreto autocompactable.

Tomando lo anterior en consideración y usando una relación agua-cemento baja para crear un producto de calidad, se debe agregar también una gran cantidad de cemento. Obviamente, esto es una desventaja desde un punto de vista económico y también por razones técnicas. Por esto una parte del cemento debe ser reemplazada por otros materiales finos (aditivos minerales), como polvo de carbonato de calcio, ceniza volante, humo de sílice, entre otros. Además, la adición de estos materiales finos extra en las mezclas de concreto autocompactable puede causar una mejora en su estabilidad, evitando así la segregación^[5].

1.1.1.4. Ventajas y desventajas del concreto autocompactable

Ventajas

- Debido a su alta fluidez, el aire puede escapar sin la necesidad de ninguna energía de compactación.
- Reducción de energía necesaria para su colado.
- Se puede realizar el colado en una sola capa, siempre y cuando la cimbra pueda soportar la presión.

- Ya que no necesita compactación, se puede bombear desde la parte inferior de la cimbra. Como consecuencia, se puede incrementar la altura de los elementos estructurales de la industria de prefabricados y evitar las segregaciones y vacíos causados por el colado desde ciertas alturas.
- Se puede utilizar en estructuras de concreto con refuerzo congestionado, debido a su habilidad de paso.

Desventajas

- El costo del material es mayor. Aunque su aplicación causa reducciones en el costo de la mano de obra y la producción, se debe realizar un análisis de costos para justificar la aplicación del concreto autocompactable en la obra.
- Sus propiedades en estado fresco son muy sensibles a cualquier cambio de alguno de sus materiales constituyentes. Esto hace más difícil hacer la misma mezcla dos veces, incluso en condiciones de laboratorio.
- Se necesita un control más estricto de todos los materiales que lo constituyen así como de sus dosificaciones, lo cual es uno de los mayores retos en la industria del concreto.
- Aumentar su fluidez sin cuidar su estabilidad puede presentar segregación, disminuyendo la calidad de los elementos colados. Por esto se utilizan aditivos minerales y químicos para mejorar su estabilidad y evitar la segregación.

1.1.2. Aditivos minerales en el concreto autocompactable

Como se mencionó anteriormente, el concreto autocompactable demanda un consumo de cemento mayor que el del concreto convencional, para tener las propiedades que lo caracterizan. Por esto es necesario el uso de aditivos minerales, como el polvo de carbonato de calcio, ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice, entre otros, para reemplazar parte del cemento Portland. Además de los beneficios económicos, el uso de estos materiales en el concreto, que en muchos de los casos son sub-productos o desechos de algún proceso industrial, reduce la contaminación ambiental, lo que aumenta la sostenibilidad del concreto.

El uso de aditivos minerales también puede causar una mejora en las propiedades del concreto autocompactable. Estos aditivos pueden mejorar la estabilidad del concreto autocompactable, actuando como modificadores de viscosidad ^[6]. Así mismo, algunos aditivos minerales ayudan a incrementar la fluidez de los concretos autocompactables, lo que causa una disminución en la demanda de aditivos químicos superfluidificantes ^[7].

Por otra parte, el uso de aditivos minerales también ayuda a mejorar el empaquetamiento de las partículas, disminuyendo la permeabilidad del concreto y por consecuencia, aumentando su durabilidad ^[2].

Los aditivos minerales utilizados en esta investigación fueron ceniza volante y polvo de carbonato de calcio. A continuación se describen los efectos de las adiciones de estos dos polvos en algunas propiedades del concreto autocompactable.

1.1.2.1. Efecto de la ceniza volante en las propiedades del concreto autocompactable

La ceniza volante mejora las propiedades; tanto en estado fresco, como de durabilidad del concreto autocompactable. Algunas investigaciones han mostrado que el uso de ceniza volante reduce significativamente la cantidad de aditivo superfluidificante necesario para alcanzar la misma fluidez de un concreto hecho con sólo cemento Portland ^[8].

Además, se ha demostrado que el uso de la ceniza volante mejora la durabilidad del concreto. Por ejemplo, la permeabilidad a los iones cloro se reduce con el uso de este material, ya que sus aluminatos se enlazan con los iones cloro formando sal de Friedel ^[9], lo cual es de mucha ventaja cuando se tiene acero de refuerzo, ya que evita su corrosión y el consecuente deterioro del concreto.

1.1.2.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en las propiedades del concreto autocompactable

El polvo de carbonato de calcio se usa en el concreto autocompactable como material de relleno. Generalmente se utiliza este polvo con tamaños de partícula pequeños (menores o iguales que los del cemento Portland) para ayudar a llenar los vacíos dentro del concreto y así mejorar el empaquetamiento de las partículas.

Además, este polvo es ampliamente utilizado para mejorar la estabilidad de los concretos autocompactables, ya que aumenta la viscosidad del concreto y previene la segregación ^[10]. También se usa en combinación con puzolanas, ya que ayuda a contrarrestar los retrasos en los tiempos de fraguado causados por materiales como la ceniza volante, al acelerar la hidratación de la pasta por proveer centros de nucleación en los que los productos de hidratación pueden precipitar ^[11].

1.2. Marco teórico

En el presente estudio se investigó el efecto que tienen las sustituciones de ceniza volante y polvo de carbonato de calcio en la durabilidad de los concretos autocompactables. Por tal motivo, esta sección se enfoca en los temas específicos sobre los indicadores de durabilidad utilizados para la evaluación de las mezclas estudiadas.

1.2.1. Carbonatación

El proceso de carbonatación es simple en la teoría, pero complejo en la realidad. Básicamente, el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ entra en contacto con el dióxido de carbono (CO_2) formando carbonato de calcio (CaCO_3). El agua no forma parte del producto, pero es necesaria para la transformación. Cuando el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se consume en su totalidad, el valor del pH de la pasta de cemento y de la solución de poro baja y las otras fases comienzan a descomponerse. El producto final consiste en una mezcla de carbonatos con fases hidratadas de ferrita, silicato y aluminio.

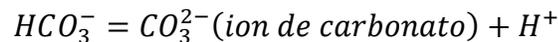
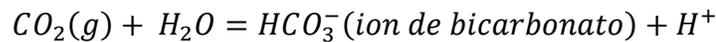
La carbonatación consiste en un proceso de difusión del dióxido de carbono (en forma de gas o de iones), que está controlado por el grado de saturación de agua del sistema capilar. Generalmente, el concreto carbonatado conserva su dureza y estabilidad, así que la carbonatación no representa algún daño al concreto simple. Sin embargo, la mayoría de las estructuras de concreto contienen acero de refuerzo, que puede llegar a corroerse cuando el concreto está carbonatado, resultando problemas de durabilidad que en deterioros importantes pueden causar problemas estructurales.

1.2.1.1. *Química de la carbonatación*

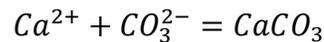
La carbonatación se presenta cuando los iones de carbonato y los iones de calcio (presentes en la solución de poro) precipitan y forman carbonato de calcio. En el concreto esto resulta en la disolución de todos los componentes que poseen Ca, para finalmente formar carbonato de calcio.

La atmósfera contiene cantidades substanciales de dióxido de carbono; sin embargo, el CO₂ en forma de gas no puede reaccionar directamente con las fases hidratadas del cemento, pues para esto tiene que disolverse primero en agua y formar iones de carbonato que reaccionarán con los iones de calcio de la solución de poro.

El proceso de carbonatación se puede describir mediante las siguientes ecuaciones químicas;



El ion de carbonato reaccionará entonces con los iones de calcio de la solución de poro.



Esto ocasiona una reducción en la concentración de Ca²⁺ lo cual, a su vez, ocasionará la disolución del hidróxido de calcio principalmente. Por lo tanto, el Ca(OH)₂ se disolverá, el CaCO₃ precipitará y el proceso continuará hasta que todo el hidróxido de calcio sea consumido. Cuando se consume todo el hidróxido de calcio, el pH y la concentración de iones de calcio decrecen y entonces el C-S-H comienza a disolverse. Además, el monosulfato (AFm) se descompone, cuando el valor del pH baja a alrededor de 11.6 y después la etringita (Aft) se descompone a un pH alrededor de 10.6 ^[12].

1.2.1.2. Mecanismos de carbonatación

La carbonatación es un proceso de difusión de dióxido de carbono gaseoso con iones carbonatados. La difusión del gas es mucho más rápida que la de los iones. Por lo tanto, la velocidad de carbonatación depende de la humedad interna del concreto. En los concretos secos el dióxido de carbono puede penetrar a gran profundidad, pero no hay suficiente agua para que se lleve a cabo la reacción de carbonatación. Por lo tanto, hay una condición de humedad óptima en la cual la velocidad de carbonatación está en su punto máximo.

La difusión está controlada por las diferencias de concentración. El carbonato precipita en la superficie del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cuando la concentración de CO_3^{2-} es alta; sin embargo, si la concentración de Ca^{2+} es alta, el carbonato puede precipitar en la solución de poro o en alguna otra fase. Si los iones de carbonato se mueven más rápido que los de calcio y el carbonato de calcio precipita en la superficie del hidróxido de calcio se forma una barrera porosa de carbonato de calcio alrededor del hidróxido de calcio, la cual retrasa la carbonatación. Por otra parte, si el Ca^{2+} se mueve más rápido que los iones de carbonato, el hidróxido de calcio se disolverá y el carbonato de calcio precipitará en forma de cristales dentro del sistema capilar, lo cual ocasiona un cambio en el volumen que resulta en la densificación de la pasta y la reducción de la porosidad.

Cuando todo el hidróxido de calcio sea consumido, la carbonatación empezará a consumir al C-S-H que se disolverá de forma diferente al hidróxido de calcio. Cuando se agota el hidróxido de calcio en la pasta, los carbonatos consumen iones Ca^{2+} liberados por el C-S-H. Por lo tanto, el gradiente de concentración de iones de calcio descenderá y la difusión se alentará.

1.2.1.3. Velocidad de carbonatación

El concreto se carbonatará siempre que se encuentren disponibles dióxido de carbono y agua. La velocidad de carbonatación depende de qué tan rápido el dióxido de carbono y/o los iones de carbonato se muevan dentro del concreto y reaccionen con la pasta de cemento. La velocidad lenta de carbonatación en un ambiente húmedo o uno saturado muestra que la difusión de los iones carbonato es comparablemente baja. Mientras que la difusión de gas en un sistema capilar seco es rápida pero, se requiere agua para la formación de los iones carbonato que causan la carbonatación.

- **Humedad**

Como se mencionó anteriormente, la velocidad de carbonatación disminuirá en ambientes muy secos y en ambientes muy húmedos o saturados. La máxima velocidad de carbonatación se presenta cuando la humedad relativa (RH) está entre un 60 y un 80% (dentro del concreto) ^[12]. Los ciclos de mojado y secado también parecen acelerar el proceso de carbonatación.

- **Temperatura**

Tanto la velocidad de difusión como la de carbonatación incrementan con la temperatura.

- **Contenido de cementante**

La difusión ocurre dentro de la pasta y no del agregado (asumiendo que se tiene un agregado denso). La cantidad de cementante no afecta la velocidad de carbonatación siempre que se mantenga constante la relación agua-cementante; es decir, una cantidad de pasta mayor, pero con la misma porosidad, tendrá la misma profundidad de carbonatación, pero con mayor volumen de pasta carbonatada.

- **Calidad del concreto**

Una relación agua-cementante más alta y un grado de hidratación mayor producen un concreto denso con menor porosidad. Esto tendrá también como resultado productos de carbonatación densos y consecuentemente, una reducción en la carbonatación. Es bien sabido que un mal curado resultará en una velocidad de carbonatación mayor, posiblemente por la disminución del grado de hidratación.

- **Tipo de cemento y efecto de las puzolanas**

Cada día es más común el uso de cementos compuestos. Estos cementos están compuestos de clínker de cemento Portland, yeso, caliza, escoria de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, etc.

Se puede asumir que en los cementos compuestos con caliza (carbonato de calcio) se carbonatarán más rápido (en profundidad) mientras la fracción pasta del cemento Portland y su capacidad de amortiguamiento, otorgada por la cantidad de hidróxido de calcio, sean menores

En cuanto a la ceniza volante, su reacción puzolánica causará una disminución en el contenido de hidróxido de calcio y un aumento en el contenido de C-S-H. Menor cantidad de hidróxido de calcio incrementará la velocidad de carbonatación (en profundidad); sin embargo, se debe tomar en cuenta el aumento en la cantidad de C-S-H y su efecto en la pasta ya carbonatada ^[12].

1.2.2. Permeabilidad a los iones cloro

Los cloruros no causan daño alguno al concreto, pero inducen la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto reforzado. La corrosión del acero de refuerzo inducida por los cloruros es el proceso de degradación más importante en las estructuras de concreto reforzado, el cual tiene importantes consecuencias, tanto económicas como sociales. Existen dos fuentes principales de ingreso de cloruros dentro de las estructuras de concreto: el agua de mar y los agentes descongelandantes utilizados en el invierno.

La penetración de los cloruros en el concreto involucra procesos físicos y químicos complejos. Esta complejidad está causada por lo menos por tres factores:

- El ambiente externo no es constante. Por ejemplo, en ambientes marinos la cantidad de cloruros en contacto con el concreto depende de si la estructura se encuentra sumergida totalmente en el agua de mar o al alcance de las olas, o si simplemente está en contacto con la brisa del agua de mar.
- El concreto está constituido por diferentes tipos de cementos y cementantes, con diferentes proporciones de mezcla, lo que hace al concreto un material heterogéneo y con propiedades dependientes de la edad.
- Los mecanismos de penetración de los cloruros no son sencillos (difusión simple) sino una combinación de absorción, enlaces físicos y químicos, interacción entre iones, etc.

1.2.2.1. Mecanismos de penetración

Los cloruros existen en el concreto en dos formas: cloruros libres y cloruros enlazados. La cantidad total de cloruros en el concreto es la suma de estos dos, de los cuales, solo los cloruros libres se pueden mover y contribuir con un potencial químico o de concentración.

Los cloruros penetran en el concreto de diferentes formas, principalmente por difusión en los poros saturados de agua y son transportados a través de los poros debido a la permeabilidad y la succión de éstos. El ingreso de los cloruros generalmente está acompañado por enlaces físicos y químicos.

El movimiento de los cloruros a través de la solución generalmente causa enlaces que pueden retrasar significativamente el proceso de penetración. La capacidad del concreto para enlazar cloruros depende del tipo de cementante y de sus productos de hidratación. También es afectado por otros factores, especialmente por la temperatura y la concentración de álcalis.

1.2.2.2. Métodos de medición

Se han propuesto muchos métodos para la medición de la penetración de los cloruros en el concreto, debido a su importancia en cuanto a la durabilidad de las estructuras de concreto, aunque la complejidad de este proceso ha dificultado el arribo a un acuerdo general sobre un solo método de prueba.

En Norte América se han utilizado dos métodos estándar por algunos años:

- ASTM C-1202 “Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration”.

- ASTM C 1543 “Standard test method for determining the penetration of chloride ion into concrete by ponding”.

En los países Nórdicos existen tres métodos de prueba desarrollados por el NORDTEST:

- NT BUILD 443 “Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration” basado en un estado de difusión no estacionario bajo concentraciones altas de cloruro.
- NT BUILD 355 “Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments” basado en un estado de difusión estacionario.
- NT BUILD 492, “Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Diffusion Coefficient from Non-steady Migration Experiments” basado en un estado de difusión no estacionario.

1.2.2.3. Penetración de cloruros en el concreto autocompactable

Debido a sus requerimientos de trabajabilidad, el concreto autocompactable contiene un gran volumen de polvos (cemento, adiciones puzolánicas y “filler”), además de una cantidad mayor de aditivos químicos comparado con el concreto convencional. Estas diferencias pueden resultar también en diferencias en el volumen de los poros y en la composición de los iones en la solución de poro y quizás en diferentes comportamientos de enlaces de cloruros ^[13].

1.2.2.4. Efecto de adiciones minerales

La adición de puzolanas (como la ceniza volante), en las mezclas de concreto, conduce a una reducción en la penetración de cloruros. Por un lado, estas puzolanas son responsables de la formación de una microestructura más densa y menos porosa y un sistema de poros más discontinuo, lo cual reduce la permeabilidad a los iones cloro. Además, los cloruros se enlazan con las fases de aluminato tricálcico (C_3A) los que se presentan en mayor cantidad en las mezclas que contienen puzolanas silicoaluminosas. Como se mencionó anteriormente, este aumento en la capacidad del concreto para crear enlaces con los cloruros puede retrasar significativamente el proceso de penetración y además, deja menos cloruros libres que inicien el proceso de corrosión del acero ^[14].

Otros aditivos minerales, como el polvo de carbonato de calcio, causan un efecto negativo en cuanto a la penetración de los cloruros. La adición de polvo de carbonato de calcio aumenta la cantidad de iones OH^- presentes en la solución de poro. Los iones OH^- actúan como un electrolito y son los responsables del transporte de una cantidad significativa de cargas durante la permeabilidad a los iones cloro, debido a su alta conductividad iónica, que es más alta que la de los otros iones presentes en la solución de poro ^{[15][16]}.

1.2.3. Resistividad eléctrica

La resistividad del concreto es una propiedad independiente de la geometría que describe la resistencia eléctrica, que es la relación entre un voltaje aplicado y su corriente

resultante, multiplicada por una dimensión longitudinal, es usualmente representada en unidades de Ω m.

La resistividad eléctrica del concreto puede variar en un grado amplio, de 10^1 a 10^5 Ω m, bajo la influencia del contenido de humedad en el concreto y la composición del mismo. En el concreto, la corriente es transportada por los iones disueltos en la solución de poro. Para un contenido de humedad constante, la resistividad aumenta con la disminución de la relación agua-cementante, con mayor tiempo de curado y por la adición de materiales reactivos, como escoria de alto horno, ceniza volante y humo de sílice. También se presenta un aumento en la resistividad cuando el concreto se seca y cuando se carbonata ^[17].

1.2.3.1. Resistividad eléctrica y penetración de cloruros

Algunos trabajos teóricos y experimentales han demostrado que existe una correlación inversa entre la resistividad del concreto y la velocidad de difusión de los cloruros. Los puntos más permeables dentro de una estructura particular tendrán resistividades bajas y altas cantidades de penetración de cloruros ^[18].

1.2.3.2. Principios de medición

Se puede medir la resistividad cercana a la superficie del concreto de cualquier estructura de manera no destructiva, utilizando electrodos sobre la superficie del concreto. Esto requiere de por lo menos dos electrodos. Para esta medición se aplica un voltaje entre los electrodos y se mide la corriente resultante (o viceversa). La relación entre el voltaje y la

corriente da como resultado una resistencia (Ω). La resistividad se obtiene multiplicando la resistencia medida por un factor de corrección llamado constante de celda (m) ^[17].

1.2.3.3. Efecto de la temperatura en la resistividad

Los cambios en la temperatura tienen efectos importantes en la resistividad del concreto. En general, un incremento en la temperatura causa una disminución de resistividad y viceversa. Esto es el resultado de la influencia de la temperatura en la movilidad y las interacciones de los iones.

1.2.3.4. Flujo de corriente en el concreto

La corriente fluye dentro del concreto a través de la solución de poro de la pasta cementante. Las partículas de agregados son esencialmente cuerpos inertes. Esto hace que el concreto no sea un conductor homogéneo lo cual tiene como consecuencia que la carga tampoco sea homogénea. Además, la presencia de acero de refuerzo cerca de la superficie y concreto carbonatado también afectan al flujo de la corriente, lo cual conduce a errores en la medición de la resistividad.

1.2.3.5. Concentración de iones en solución de poro

La calidad de la solución de poro está relacionada con la edad y el tipo de concreto, el tipo de cemento y la relación agua-cementante. Los componentes principales de la solución de poro son los iones K^+ , Na^+ y OH^- y en menor cantidad, se encuentran los iones Ca^{2+} y SO^{2-} ^[17]. Cada uno de estos iones tiene una conductividad eléctrica

diferente; por lo tanto, la resistividad de una mezcla dependerá de la concentración en la que estén presentes cada uno de ellos.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En la presente investigación se evaluó el efecto que tienen las sustituciones de cemento Portland por combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio en las propiedades de durabilidad de los concretos autocompactables.

El polvo de carbonato de calcio se ha utilizado en investigaciones previas para contrarrestar los retardos en los tiempos de fraguado de los concretos con ceniza volante; sin embargo, pocas investigaciones han evaluado el efecto de la combinación de estos polvos en la durabilidad del concreto ^[19].

A continuación se presentan algunas investigaciones previas, en las que se ha evaluado el efecto de las sustituciones de ceniza volante y/o de polvo de carbonato de calcio en indicadores de durabilidad del concreto (tanto convencional como autocompactable), tales como: carbonatación, permeabilidad a los iones cloro y resistividad eléctrica. Además, se enlistan las investigaciones en las cuales se ha utilizado el polvo de carbonato de calcio para la aceleración de la hidratación de concretos con ceniza volante.

2.1. Carbonatación

2.1.1. Efecto de la ceniza volante en la carbonatación

Atiş (2001), estudió el efecto que tiene el reemplazo del cemento Portland del concreto, por un 50 y u 70% (en masa) de una ceniza volante clase F. Las mezclas con ceniza volante tuvieron una relación agua-cementante de 0.3, mientras que la referencia tuvo una relación agua-cemento de 0.55. Se realizó la prueba de carbonatación en especímenes curados a diferentes edades (3, 7,28 días y 3 meses) y dos tipos de condiciones de curado (seco y húmedo). Los especímenes fueron almacenados durante dos semanas en la cámara de carbonatación con una concentración de CO_2 de 5%. Los resultados mostraron que los concretos con un 70% de sustitución de ceniza volante se carbonataron más que el concreto de referencia sin importar la condición de curado. También se observó que los especímenes curados en seco presentaron mayores profundidades de carbonatación, en comparación con los especímenes curados en húmedo ^[20].

Khunthongkeaw et al. (2006), estudiaron el efecto de las sustituciones de cemento Portland por ceniza volante. Utilizaron dos tipos de ceniza volante: con bajo y alto contenido de calcio, en diferentes sustituciones. Observaron el efecto del tipo y contenido de ceniza volante en el coeficiente de carbonatación de especímenes de concreto, el que aumenta al incrementar el contenido de ceniza volante. Esto se lo atribuyeron a la reducción de Ca(OH)_2 , debido a la reacción puzolánica y a la reducción del contenido de cemento Portland. También observaron que el coeficiente de carbonatación es mayor al utilizar la ceniza volante con menor contenido de calcio, ya que la ceniza con alto contenido de calcio aporta Ca(OH)_2 y disminuye la porosidad en el concreto ^[21].

Younsi, et al. (2011), evaluaron el efecto que tienen las sustituciones de altos contenidos de ceniza volante en la carbonatación de concretos diseñados en base a la resistencia a la compresión. Evaluaron también dos diferentes condiciones de curado: bajo el agua y al aire a 20°C y humedad relativa entre 50 y 70%. Observaron que la profundidad de carbonatación fue entre un 20 y un 50% menor en los especímenes curados bajo el agua, con respecto a aquéllos curados al aire y que las mezclas más influenciadas por el tipo de curado fueron las que contenían menor contenido de clínker de cemento Portland. Además, observaron que, al incrementar las sustituciones de ceniza volante la profundidad de carbonatación también incrementaba, lo cual fue atribuido al bajo contenido de Ca(OH)_2 presente en las mezclas de concreto con ceniza volante ^[22].

2.1.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la carbonatación

Matthews (1994), reportó información sobre la carbonatación de mezclas de concreto (relación agua-polvos de aproximadamente 0.6) producidas con cinco tipos de cemento diferentes. Cada tipo de cemento se molió en conjunto con 0, 5 y 25% de polvo de carbonato de calcio. Los especímenes de concreto producidos fueron curados, en húmedo, a 1 y 3 días. Posteriormente fueron expuestos a las condiciones de humedad, temperatura y CO_2 del medio ambiente exterior durante 5 años (protegiéndolos de la lluvia). Matthews reportó que la profundidad de carbonatación mayor se presentó en los concretos producidos con el cementante de 25% de polvo de carbonato de calcio. Además, observó que la relación agua-cemento Portland era directamente proporcional a la profundidad de carbonatación ^[23].

Barker et al. (1994), estudiaron el efecto del polvo de carbonato de calcio (0, 9, 15 y 24%, molido en conjunto con el cemento Portland), en la carbonatación de dos series de concreto. La serie A con la misma relación agua-polvos (0.60) y la serie B, en las cuales las mezclas fueron proporcionadas para obtener la misma resistencia a la compresión a los 28 días (44 MPa). Los resultados revelaron que, sin importar el tipo de cemento o la cantidad de polvo de carbonato de calcio, los concretos de resistencias iguales se carbonataban de manera similar ^[24].

Collepari et al. (2004), reportaron que la sustitución de cemento Portland por polvo de carbonato de calcio (15 y 25%) condujo a un incremento en el grado de carbonatación, comparando las mezclas con la misma relación agua-polvos. Sin embargo, observó el mismo efecto al sustituir un 25% de ceniza volante y al sustituir un 25% de polvo de carbonato de calcio. Por esta razón, concluyeron que para un cierto grado de humedad y curado y de condiciones de exposición, el grado de carbonatación está en función de la resistencia a la compresión del concreto y parece ser totalmente independiente del tipo de cementante utilizado ^[25].

2.1.3. Efecto de las combinaciones de CV y polvo de CaCO₃ en la carbonatación

El grado de carbonatación está altamente influenciado por el contenido de poros y también por la cantidad de Ca(OH)₂ en el concreto, el cual tiende a disminuir al sustituir el cemento Portland por ceniza volante y/o polvo de carbonato de calcio. Menor contenido de Ca(OH)₂ conduce a un mayor grado de carbonatación.

De-Weerd et al. (2011), evaluaron la sinergia de diferentes combinaciones de ceniza volante y polvo de carbonato de calcio en cementos ternarios. Observaron que el contenido de Ca(OH)_2 disminuye conforme el cemento Portland se sustituye por ceniza volante y/o por polvo de carbonato de calcio. Además, observaron que el contenido de Ca(OH)_2 permaneció constante en cementos que contenían un 65% de cemento Portland ordinario y un 35% de combinaciones de ceniza volante y polvo de carbonato de calcio. En la Figura 2.1 se muestra lo dicho anteriormente [26].

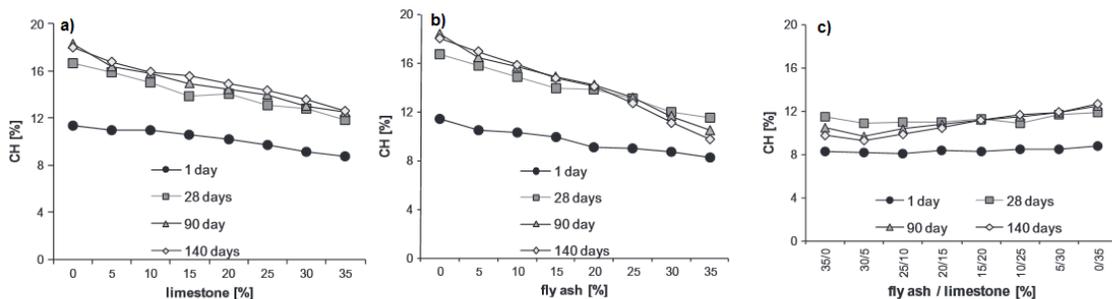


Figura 2.1 - Efecto de la cantidad de ceniza volante y el polvo de carbonato de calcio en la cantidad de hidróxido de calcio de la mezcla (K. De Weerd, 2011)

2.2. Permeabilidad a los iones cloro

2.2.1. Efecto de la ceniza volante en la permeabilidad a los iones cloro

Ramezaniapour et al (1995), evaluaron el efecto que tiene la utilización de una ceniza volante clase F (ASTM 618) en la resistencia a la penetración de iones cloro en el concreto, bajo diferentes condiciones de curado. Se utilizaron sustituciones de ceniza volante de un 25 y un 58% en masa. Los resultados mostraron que las mezclas con ceniza volante tuvieron una permeabilidad a los iones cloro mucho menor que la referencia para

todas las condiciones de curado. Este efecto se lo atribuyeron al cambio en la estructura de poro, debido a las reacciones puzolánicas de la ceniza volante; sobre todo para el tipo de curado en húmedo ^[27].

Dinakar et al. (2008), compararon concretos convencionales con diferentes grados de resistencia (diferentes relaciones agua-cemento) contra concretos autocompactables con sustituciones de ceniza volante en volumen, que iban desde un 10% hasta un 85%. Los resultados mostraron que, a pesar de los otros parámetros de permeabilidad (como porosidad), todos los concretos autocompactables (todos con ceniza volante) tuvieron permeabilidades a los iones cloro más bajas que los concretos convencionales con puro cemento Portland. Esto se atribuyó a la capacidad que tienen los aluminatos presentes en la ceniza volante de enlazarse con los cloruros ^[28].

Usyal et al. (2011), evaluaron el efecto de diferentes adiciones minerales en la permeabilidad a los iones cloro de concretos autocompactables. Utilizaron una ceniza volante de clase C, además de otras adiciones minerales. También observaron una reducción en la permeabilidad a los iones cloro al utilizar ceniza volante y concluyeron que esta propiedad está altamente influenciada por el contenido de alúmina en el concreto, ya que la permeabilidad disminuyó al aumentar el contenido de Al_2O_3 en el concreto ^[14].

Wongkeo et al. (2014), utilizaron una ceniza volante de alto contenido de calcio en concretos autocompactables. También observaron una reducción en la permeabilidad a

los iones cloro. Esto se lo atribuyeron también al enlace de los aluminatos con los cloruros, los cuales forman compuestos estables (sal de Friedel y cloruro férrico de calcio), dejando menos cloruros libres en la mezcla ^[29].

2.2.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la permeabilidad a los iones cloro

Bonavetti et al. (2000), investigaron el efecto de un cemento Portland normal y dos cementos compuestos (con un 9.3% y un 18.1% de contenido de polvo de carbonato de calcio), en la permeabilidad a los iones cloro de concretos fabricados con relación agua-cemento de 0.50 y contenido de cementante de 350 kg/m³. Observaron que los concretos fabricados con los cementos compuestos presentaron mayor permeabilidad a los iones cloro que el concreto de cemento Portland ordinario (referencia) cuando los especímenes fueron curados en húmedo. Sin embargo, al ser curados al aire, los concretos fabricados con los cementos compuestos tuvieron una menor permeabilidad que la referencia ^[30].

Ghrici et al. (2007), investigaron el efecto de la sustitución de un 15% de polvo de carbonato de calcio (con una fineza de 3700 cm²/g) en la permeabilidad a los iones cloro del concreto. Observaron que para relaciones agua-cementante de 0.60 en los concretos fabricados con la sustitución de 15% de polvo de carbonato de calcio, con respecto al concreto fabricado con puro cemento Portland, la permeabilidad a los iones cloro aumentaba por un 67% y un 135% a las edades de 28 y 90 días, respectivamente. Le atribuyeron este efecto a que el concreto con polvo de carbonato de calcio contiene más iones OH⁻ en la solución de poro, mismos que tienen una conductividad iónica mayor que

la de los otros iones presentes en la solución de poro y que esto, consecuentemente, condujo al incremento en la permeabilidad a los iones cloro ^[15].

Gesoğlu et al. (2012), investigaron el efecto que tiene el tipo de “filler” utilizado en la permeabilidad a los iones cloro de concretos autocompactables. Utilizaron dos tipos de “filler” de carbonato de calcio: uno de caliza con fineza Blaine de 3990 cm²/g y otro de mármol con fineza Blaine de 5190 cm²/g. Este último siendo más fino que el cemento Portland utilizado (3387 cm²/g). Fabricaron concretos autocompactables con contenido de cementante de 520 kg/m³ y las sustituciones de ambos “fillers” fueron de 5, 10 y 20% (en masa). La relación agua-cementante utilizada fue de 0.35. En los resultados observaron que el “filler” de carbonato de calcio (mármol) de mayor fineza presentó una mejor permeabilidad a los iones cloro que el polvo de carbonato de calcio (caliza) de menor fineza ^[31].

2.2.3. Efecto de las combinaciones de CV y polvo de CaCO₃ en la permeabilidad a los iones cloro

Aguayo et al. (2014), investigaron la permeabilidad a los iones cloro de concretos fabricados con cementos binarios (cemento Portland + polvo de carbonato de calcio) y ternarios (cemento Portland + polvo de carbonato de calcio + ceniza volante). Utilizaron polvos de carbonato de calcio con dos tamaños de partícula diferentes (3 µm y 10µm) los cuales fueron combinados para que el área superficial específica de los cementos combinados se aproximara a la del cemento Portland. Encontraron los mayores valores de permeabilidad a los iones cloro en los concretos fabricados con los cementos binarios.

También mostraron los beneficios de utilizar el polvo de carbonato de calcio con la ceniza volante (cementos ternarios), ya que los concretos fabricados con los cementos ternarios tuvieron una gran reducción de permeabilidad, comparados con los concretos fabricados con los cementos binarios. Explicaron que esto debe ser causado por el refinamiento de los poros que se presenta por la presencia de la ceniza volante, debido a las reacciones puzolánicas de ésta y también a la formación de fases de carboaluminato ^[32].

2.3. Resistividad eléctrica

2.3.1. Efecto de la ceniza volante en la resistividad eléctrica

Shi et al. (1998), estudiaron la influencia que tienen las sustituciones de altos volúmenes de ceniza volante (60% en masa), en la conductividad eléctrica de la solución de poro. La conductividad eléctrica es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica; es decir, a mayor conductividad eléctrica menor resistividad y viceversa. Los resultados indicaron que la sustitución de un 60% de ceniza volante presentó una reducción en la conductividad eléctrica a los 28 días, de 3.8%, con respecto a la referencia y que este valor incrementó a 28.7%, a los 90 días. Especifican que la composición de la solución de poro depende del contenido de álcalis de la ceniza volante; es decir, su uso puede incrementar o disminuir las concentraciones de los iones Na^+ y K^+ en la solución de poro; sin embargo, usualmente su utilización disminuye el contenido de iones Ca^{2+} y OH^- de la solución de poros, siendo el último el más conductivo de todos ^[33].

2.3.2. Efecto del polvo de carbonato de calcio en la resistividad eléctrica

No hay un acuerdo general en la literatura que considere el efecto de la adición del polvo de carbonato de calcio en la resistividad eléctrica de concretos y morteros. **Ghrici et al. (2007)**, asumen que hay más iones OH^- en la solución de poro de los concretos con polvo de carbonato de calcio, en relación con la solución de poro de los concretos sin este polvo, ya que este ion es el más conductivo de todos los presentes en la solución de poro ^[15]. Sin embargo, estudios realizados por **De-Weerd et al. (2011)**, mostraron que el contenido de iones OH^- no varía significativamente al sustituir una porción del cemento Portland por polvo de carbonato de calcio. Por otra parte, en este estudio también se observó que el contenido de iones sulfato sí aumenta considerablemente en la solución de poro, al aumentar el contenido de polvo de carbonato de calcio ^[11]. Este ion es el segundo más conductivo de los iones presentes en la solución de poro; por lo tanto, el aumento de éste podría significar un aumento en la conductividad total de la solución de poro y por consecuencia una reducción significativa en la resistividad eléctrica ^{[34],[35]}.

2.4. Uso de polvo de caliza para la aceleración de la hidratación en mezclas con altos volúmenes de ceniza volante

Los altos contenidos de ceniza volante en las mezclas de concreto son de interés, debido a sus ventajas en los costos y en términos de sostenibilidad. El desempeño a largo plazo de estas mezclas, generalmente iguala o excede al del concreto convencional, pero a edades tempranas se caracteriza por un retardo significativo en las reacciones de hidratación.

Gurney et al. (2012), realizaron un estudio para determinar si el polvo de carbonato de calcio puede reducir los retrasos en el fraguado. En este estudio se evaluó el efecto del área superficial del polvo de carbonato en los tiempos de fraguado en mezclas con ceniza volante clases C y F. Para 5 tamaños de polvo de carbonato de calcio de: $17\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $1.4\mu\text{m}$, $0.7\mu\text{m}$ y un nano-carbonato de calcio con diámetro de partícula promedio de $0.05\text{-}0.12\mu\text{m}$, se estudiaron remplazos del 40%, en volumen, de ceniza volante por cemento Portland, utilizando el polvo de carbonato de calcio en substitución de la C.V. para todos los tamaños. Se utilizó una relación A/Cm, en masa, de 0.35. Para las dos clases de ceniza volante, los resultados mostraron que se reducen los tiempos de fraguado al incrementar el volumen y la disminución del tamaño de la partícula del polvo de carbonato de calcio. Para contrarrestar el retraso en los tiempos de fraguado con la ceniza volante clase “F”, los resultados sugieren que se puede usar polvo de carbonato de calcio con tamaño de partícula de entre $0.7\text{-}0.12\mu\text{m}$ ^[36].

Bentz et al. (2012), investigaron el efecto de tres polvos de carbonato de calcio de diferentes tamaños: uno de tamaño nano ($50\text{-}120\text{nm}$), y los otros dos polvos con diámetros de partícula de $4.4\mu\text{m}$ y $16.4\mu\text{m}$. Para los tres tamaños de polvo de carbonato de calcio, en este estudio se utilizó una ceniza tipo C y substituciones de C.V. y polvo de carbonato de calcio en las proporciones CPO:CV:PdCaCO₃ que se indican a continuación: 55:40:5 y 60:30:10. Se prepararon pastas con volúmenes constantes de agua y polvos, con relación A/Cm de 0.30; para fines de comparación, se realizó una pasta de cemento Portland de relación A/Cm de 0.42. Se prepararon especímenes para medir el tiempo de fraguado con las agujas de Vicat. Los resultados mostraron que la

pasta con un 40% de ceniza volante presentó un retardo en el fraguado inicial de 2 horas con respecto a la pasta de 100% cemento Portland, mientras que el fraguado final tuvo un retraso de 2.5 horas. Los resultados del nano carbonato de calcio indicaron que un remplazo del 5% en volumen de cemento, con nano-carbonato de calcio, en la pasta con 40% ceniza volante, restaura los tiempos de fraguado a valores comparables con los de las pastas con 100% cemento Portland. Con relación a la pasta con sustitución exclusiva de ceniza volante por cemento, en general, todas las pastas con polvo de carbonato de calcio y ceniza volante excedieron la resistencia a la compresión de 1 día; también se observaron resistencias comparables a edades posteriores. Como se observó en estudios previos, la fineza del polvo de carbonato de calcio es determinante en el desempeño a edades tempranas ^[37].

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

Estudiar el efecto sinérgico de la sustitución del cemento Portland por dos aditivos minerales (polvos): ceniza volante y micro polvo de carbonato de calcio, en indicadores de durabilidad de concretos autocompactables: permeabilidad a los iones cloro, carbonatación y resistividad eléctrica.

3.1.2. Objetivos particulares

- Fabricar un concreto autocompactable que cumpla con los parámetros de autocompactabilidad especificados por “The European Guidelines for Self Compacting Concrete”.
- Convertir un concreto autocompactable en mortero, mediante el método de mortero equivalente a concreto.
- Establecer sustituciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio que no demeriten las propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla de mortero equivalente a concreto autocompactable base Cemento Portland.

- Caracterizar el efecto de las sustituciones de cemento Portland por las combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio, en propiedades típicas, tanto en estado fresco como endurecido, incluyendo indicadores de durabilidad como: la permeabilidad a los iones cloro, la carbonatación y la resistividad eléctrica.

3.2. Justificación

En los concretos autocompactables es común el uso de aditivos minerales (polvos), utilizados ya sea para reemplazar una parte de sus altos contenidos de cemento Portland, o para mejorar algunas propiedades, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Estos aditivos minerales también pueden mejorar el empaquetamiento de las partículas y disminuir la permeabilidad del concreto aumentando así su durabilidad.

Por esta razón, era necesario investigar el efecto de la sustitución del cemento Portland por dos aditivos minerales (polvos): ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio, en la durabilidad de los concretos autocompactables.

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN

4.1. Descripción de Materiales:

4.1.1. Cemento Portland

Es el cemento hidráulico más comúnmente utilizado que se produce por la pulverización de sulfato de calcio (yeso) y clínker, que consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos, aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio^[38].

El cemento Portland utilizado fue un Ordinario de la marca Moctezuma CPO 40, cumple con la norma NMX-C-414^[39] y ASTM C-150^[40]. En la figura 4.1 se presenta una muestra de este cemento.

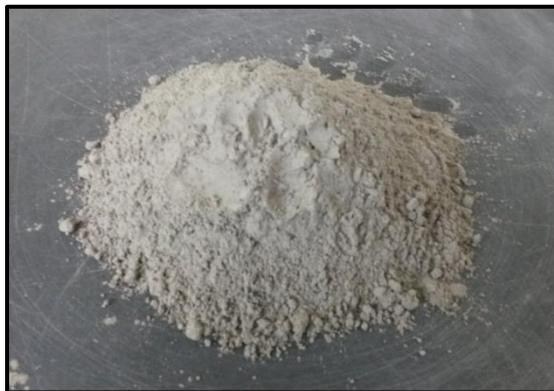


Figura 4.1 - Cemento Portland Ordinario (CPO 40)

4.1.2. Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. Se colecta de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga para obtener un polvo finamente dividido, parecido al cemento Portland. La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son: magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plenosferas, que son esferas que contienen esferas menores ^[38].

La ceniza volante utilizada en este proyecto proviene de la planta carboeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ubicada en Nava, Coahuila; México. Esta ceniza volante está clasificada por la ASTM C-618 ^[41] como clase F, debido a su bajo contenido de óxido de calcio. En la figura 4.2 se presenta una muestra de la ceniza volante utilizada.



Figura 4.2 - Ceniza volante de la CFE, Nava, Coahuila

4.1.3. Micro-polvo de carbonato de calcio

Para esta investigación se utilizó un micro-polvo de mineral de carbonato de calcio (mármol, calcita) comercializado por la compañía OMYA, con nombre comercial Omyacarb[®] UF – FL. Es un polvo ultra fino de alta pureza cuya composición química consiste en más de 99% de CaCO_3 en masa. Tiene como impureza aproximadamente un 0.2% (en masa) de sílice en forma de cuarzo (componente que se encuentra naturalmente en el CaCO_3). De acuerdo con la ficha técnica del producto, este polvo tiene un tamaño promedio de partícula de $0.7 \mu\text{m}$ y una densidad de 2.7 g/cm^3 . En la Figura 4.3 se presenta una muestra del micro polvo de carbonato de calcio.

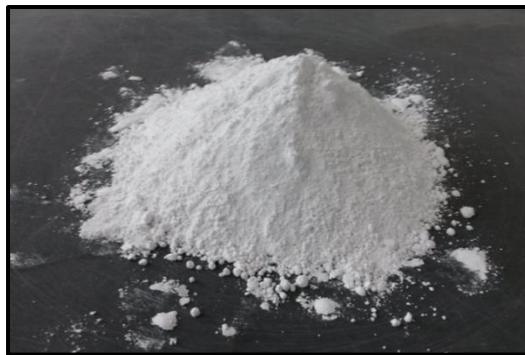


Figura 4.3 – Micro-polvo de carbonato de calcio (Omyacarb UF-FL)

4.1.4. Agregados

Los agregados fino y grueso constituyen aproximadamente entre el 60% y el 75% del volumen total del concreto. Estos deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada, deben resistir las condiciones de exposición y no deben contener materiales que pudiesen causarle deterioro al concreto ^[38]. En la Figura 4.4 se muestran los agregados utilizados en este proyecto.

4.1.4.1. Agregado fino

La norma mexicana NMX-C-111 ^[42] define al agregado fino como el material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de éstos u otros; que pasa por la criba 4.75 mm (malla No. 4) y se retiene en la criba 0.075 mm (malla No. 200). El agregado fino utilizado en esta investigación es arena caliza triturada de la región, con un tamaño máximo de 4.75 mm (malla No.4).

4.1.4.2. Agregado grueso

El agregado grueso está definido por la norma mexicana NMX-C-111 ^[42] como el material obtenido de manera natural o de la trituración de rocas, escoria de alto horno, escoria volcánica, concreto reciclado o una combinación de éstos u otros; que es retenido por la criba 4.75 mm (malla No. 4) y que pasa por la criba 90 mm (malla No. 3 1/2"). El agregado grueso utilizado en esta investigación es grava de caliza triturada de la región con un tamaño máximo de 19 mm (malla ¾ pulg).



Figura 4.4 - Agregados de caliza triturada de la región

4.1.5. Aditivos químicos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. En esta investigación se utilizaron: un aditivo reductor de agua de alto grado o hiperfluidificante y un aditivo modificador de la viscosidad (Figuras 4.5 y 4.6, respectivamente).

4.1.5.1. Aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante

Se utilizó el Plastol Precast de la compañía EUCOMEX, que es un aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante base policarboxilato, que no contiene iones cloruros adicionados, diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducir la dosificación de agua. Este aditivo cumple con la norma ASTM C-494 ^[43] como reductor de agua de alto grado tipos A y F.



Figura 4.5 – Aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante “Plastol Precast”

4.1.5.2. Aditivo modificador de la viscosidad

Para aumentar la viscosidad de las mezclas y evitar la segregación se utilizó el aditivo Viscrol de la compañía EUCOMEX. Este es un aditivo diseñado para modificar la viscosidad del concreto autocompactable, que está compuesto principalmente por agua , sulfonato de naftaleno y sulfato de sodio en menor cantidad y cuyo objetivo es contribuir a darle estabilidad estática y dinámica al concreto, para con ello evitar la segregación.



Figura 4.6 - Aditivo modificador de viscosidad “Viscrol”

4.2. Caracterización de materiales

4.2.1. Cementantes y micro polvo de carbonato de calcio

Se realizó la caracterización del cemento Portland ordinario, la ceniza volante y del micro-polvo de carbonato de calcio para obtener las propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas y para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

4.2.1.1. Densidad

La densidad de estos materiales se obtuvo mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM C-188 ^[44], utilizando el frasco de *Le Chatelier*.

4.2.1.2. Distribución de tamaño de partículas

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el analizador de difracción láser de la marca MICROTRAC (Figura 4.7). La prueba se realizó utilizando una solución de material en polvo y alcohol iso-propílico, con una pureza de 99.5%; sometiendo la solución a una dispersión con ultrasonido, para eliminar posibles aglomeraciones en el material.



Figura 4.7 - Analizador de difracción láser MICROTRAC para la obtención del DTP

4.2.1.3. Composición química

Se obtuvo la composición química de los polvos mediante Fluorescencia de Rayos “X” (FRX) para obtener los porcentajes de óxidos presentes en cada uno de los polvos.

4.2.1.4. Fases minerales

Las fases minerales de los tres polvos utilizados se midieron mediante Difracción de Rayos “X” (DRX) utilizando un difractómetro de rayos “X” Bruker D8 Advance con radiación de CuK_α de 1.5418 \AA , equipado con un detector Vantec de alta velocidad y filtros de Níquel. Para los tres polvos se ejecutó la prueba de 10 a $70^\circ 2\theta$, con una velocidad de rotación de 15rpm y un tamaño de paso (step size) de $0.05^\circ 2\theta$.



Figura 4.8 - Difractómetro de rayos "X" Bruker D8 Advance, para la medición de fases minerales

4.2.1.5. Morfología y composición elemental

Se observó la morfología de los polvos mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, *siglas en inglés*), con un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío de la marca JEOL, modelo 6490 LV (Figura 4.9). En conjunto con el SEM, se realizó la Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS, *siglas en inglés*) para identificar y cuantificar la composición elemental de las partículas observadas en las microscopías.



Figura 4.9 - Microscopio Electrónico de Barrido y equipo para Espectroscopía de Dispersión de Energía

4.2.1.6. Índice de actividad a la resistencia de la ceniza volante

El índice de actividad a la resistencia de la ceniza volante se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C-311 ^[45]. Los resultados se evaluaron de acuerdo con la especificación ASTM C-618 ^[41]. Los especímenes fueron preparados y ensayados a la compresión, de acuerdo con los procedimientos de prueba descritos en la norma ASTM C-109 ^[46].

4.2.2.- Agregados

4.2.2.1. Densidad y absorción

La densidad y la absorción de los agregados fino y grueso se obtuvieron mediante los procedimientos de prueba descritos en las normas ASTM C-128 ^[47] y ASTM C-127 ^[48], respectivamente.

4.2.2.2. Análisis granulométrico

Se realizó el análisis granulométrico de los agregados, mediante el método de prueba descrito en la norma ASTM C-136 ^[49].

4.2.3. Aditivos químicos

4.2.3.1 Densidad y porcentaje de solidos

Se obtuvo la densidad y el porcentaje de solidos de los aditivos reductor de agua de alto grado hiperfluidificante (Plastol Precast) y modificador de la viscosidad (Visctrol) mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM C-494 ^[50].

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1. Concreto autocompactable

Como primera etapa, se fabricó un concreto autocompactable (SCC) de referencia que cumpliera con las especificaciones del EFNARC “The European Guidelines for Self Compacting Concrete”^[51].

Las proporciones de este concreto autocompactable, así como sus propiedades y la clasificación según “The European Guidelines for Self Compacting Concrete” se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 - Proporcionamiento y propiedades del Concreto Autocompactable de referencia

Materiales *		Ref SCC	
(Kg/m ³)			
Agua	Reacción	166.2	
	Absorción	25.1	
Cemento		420	
HRWA (Plastol)	Consumo (L/m ³ C)	2.7	
	Dosificación (ml/kgC)	6.5	
VMA (Visctrol)	Consumo (L/m ³ C)	0.1	
	Dosificación (ml/m ³)	100	
Agregado Grueso		696.7	
Agregado Fino		1136.3	
Propiedad SCC	Método de prueba	Medición	Clasificación
Fluidez	Prueba de Fluidez (Slump-Flow) ^[52]	56.5 cm	SF1
Habilidad de paso	Anillo "J" ^[53]	51.5 cm	
Viscosidad	T50 ^[52]	6.7 s	VS2
Segregación	Columna de Segregación ^[54]	2.6%	SR2

*Materiales secos sin incluir agua de absorción en Kg/m³

5.2. Mortero equivalente a concreto

Se fabricó el mortero de referencia con una relación agua-cemento de 0.4 en masa, cuyas proporciones se establecieron a partir de la mezcla de SCC optimizada. Estas proporciones se dedujeron por medio del método de mortero equivalente a concreto (MEC) ^[55]. Para fines de comparación, las proporciones del mortero de referencia se encuentran en la Tabla 5.2, junto con las proporciones del concreto autocompactable. El procedimiento para el cálculo de las proporciones del mortero equivalente de referencia se muestra en el Anexo A.

Tabla 5.2 - Proporcionamiento del mortero de referencia calculado a partir del concreto autocompactable por el método de mortero equivalente a concreto

Materiales * (Kg/m³)		Ref SCC	Ref CEM
Agua	Reacción	166.2	221.7
	Absorción	25.1	33.4
Cemento		420	560.2
HRWA (Plastol)	Consumo (L/m ³ C)	2.7	3.6
	Dosificación (ml/kgC)	6.5	6.5
VMA (Visctrol)	Consumo (L/m ³ C)	0.1	0.13
	Dosificación (ml/m ³)	100	133.4
Agregado Grueso		696.7	-
Agregado Fino		1136.3	1532.2

*Materiales secos sin incluir agua de absorción en Kg/m³

5.3. Matriz experimental

Las proporciones del resto de los morteros estudiados se establecieron manteniendo los volúmenes de agua y de polvos (cemento Portland ordinario, ceniza volante y micro polvo de carbonato de calcio), constantes con respecto al mortero equivalente a concreto de referencia (Ref CEM). En la Tabla 5.3 se muestra la matriz experimental en la cual se presentan diferentes combinaciones de CPO, CV y micro polvo de carbonato de calcio.

Tabla 5.3 - Matriz experimental, porcentajes con respecto al volumen de polvos

Serie	Identificación	CPO	CV	L
REF	REFERNCIA	100	0	0
A	1CPO-CV	70	30	0
	1CPO-CV-5L	70	25	5
	1CPO-CV-10L	70	20	10
	1CPO-CV-15L	70	15	15
B	2CPO-CV	55	45	0
	2CPO-CV-5L	55	40	5
	2CPO-CV-10L	55	35	10
	2CPO-CV-15L	55	30	15
C	3CPO-CV	40	60	0
	3CPO-CV-5L	40	55	5
	3CPO-CV-10L	40	50	10
	3CPO-CV-15L	40	45	15

Para la fabricación de las mezclas de mortero de la matriz experimental, se estableció como fluidez objetivo la obtenida para el mortero de referencia (17 ± 2 cm). Dicha fluidez se obtuvo cambiando la dosificación del aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante base policarboxilato. En las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran las proporciones de las mezclas de las series A, B y C, respectivamente. En estas tablas se

presentan también las relaciones agua-polvos en volumen y en masa de cada mezcla. Cabe mencionar que, como se mantuvieron constantes los volúmenes de agua y polvos, la relación agua-polvos en volumen permaneció constante (1.241); sin embargo, las relaciones agua-polvos en masa variaron, con respecto a la relación agua-cemento de la mezcla de referencia, debido a que la densidad de la ceniza volante y del micro-polvo de carbonato de calcio son menores a la del cemento Portland ordinario.

Tabla 5.4 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie A

SERIE A					
Materiales * (Kg/m³)		1CPO-CV	1CPO-CV-5L	1CPO-CV-10L	1CPO-CV-15L
Agua	Reacción	224.1	224.1	224.1	224.1
	Absorción	30.36	30.36	30.35	30.35
Polvos	Cemento (CPO)	392.16	392.16	392.16	392.16
	Ceniza Volante (CV)	109.68	91.4	73.12	54.84
	CaCO ₃ (L)	0	24.2	48.4	72.61
HRWA (Plastol)	Consumo (L/m ³ C)	2.76	2.79	2.83	2.86
	Dosificación (ml/kgC)	5.5	5.5	5.5	5.5
VMA (Visctrol)	Consumo (L/m ³ C)	0.13	0.13	0.13	0.13
	Dosificación (ml/m ³)	133.4	133.4	133.4	133.4
Agregado Fino		1533.12	1533.09	1533.05	1533.02
Relación a/cm	en volumen	1.241	1.241	1.241	1.241
	en masa	0.447	0.441	0.436	0.431

*Materiales secos sin incluir agua de absorción en Kg/m³

Tabla 5.5 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie B

SERIE B					
Materiales * (Kg/m ³)		2CPO-CV	2CPO-CV-5L	2CPO-CV-10L	2CPO-CV-15L
Agua	Reacción	224.1	224.1	224.1	224.1
	Absorción	30.36	30.36	30.36	30.36
Polvos	Cemento (CPO)	308.13	308.13	308.13	308.13
	Ceniza Volante (CV)	164.52	146.24	127.96	109.68
	CaCO ₃ (L)	0	24.2	48.4	72.61
HRWA (Plastol)	Consumo (L/m ³ C)	2.55	2.58	2.62	2.65
	Dosificación (ml/kgC)	5.4	5.4	5.4	5.4
VMA (Visctrol)	Consumo (L/m ³ C)	0.13	0.13	0.13	0.13
	Dosificación (ml/m ³)	133.4	133.4	133.4	133.4
Agregado Fino		1533.33	1533.29	1533.26	1533.23
Relación a/cm	en volumen	1.241	1.241	1.241	1.241
	en masa	0.474	0.468	0.463	0.457

*Materiales secos sin incluir agua de absorción en Kg/m³

Tabla 5.6 - Proporcionamiento y relaciones a/cm de las mezclas de la serie C

SERIE C					
Materiales * (Kg/m ³)		3CPO-CV	3CPO-CV-5L	3CPO-CV-10L	3CPO-CV-15L
Agua	Reacción	224.1	224.1	224.1	224.1
	Absorción	30.36	30.36	30.35	30.35
Polvos	Cemento (CPO)	224.09	224.09	224.09	224.09
	Ceniza Volante (CV)	219.36	201.08	182.8	164.52
	CaCO ₃ (L)	0	24.2	48.4	72.61
HRWA (Plastol)	Consumo (L/m ³ C)	2.75	2.79	2.82	2.86
	Dosificación (ml/kgC)	6.2	6.2	6.2	6.2
VMA (Visctrol)	Consumo (L/m ³ C)	0.13	0.13	0.13	0.13
	Dosificación (ml/m ³)	133.4	133.4	133.4	133.4
Agregado Fino		1533.13	1533.09	1533.06	1533.02
Relación a/cm	en volumen	1.241	1.241	1.241	1.241
	en masa	0.505	0.499	0.492	0.486

*Materiales secos sin incluir agua de absorción en Kg/m³

5.4. Metodología experimental

Antes de adicionarse a la mezcla, todos los polvos fueron homogenizados utilizando un homogeneizador tipo pantalón, de la marca MICRON. Todas las mezclas de mortero se prepararon utilizando un volumen de 6 Litros, en una batidora planetaria de la marca UNIVEX. El procedimiento de mezclado se muestra en el Anexo B. Los morteros se caracterizaron en base a las propiedades descritas a continuación.



Figura 5.1- Batidora planetaria UNIVEX (izq.) y homogeneizadora de tipo pantalón MICRON (der.)

5.4.1. Propiedades en estado fresco

5.4.1.1. Fluidéz – extensibilidad

Se midió la fluidéz de los morteros con el cono de mini revenimiento, cuyas dimensiones son 50, 70 y 100 mm de altura, diámetro superior y diámetro inferior, respectivamente. El cono se puso sobre una superficie plana y no absorbente, se llenó con mortero hasta la parte superior y se enrasó. Posteriormente se levantó en un tiempo de 5 ± 2 segundos y se midió la extensibilidad del mortero. Se reportó la fluidéz como el promedio de dos mediciones del diámetro del mortero extendido (Figura 5.2).

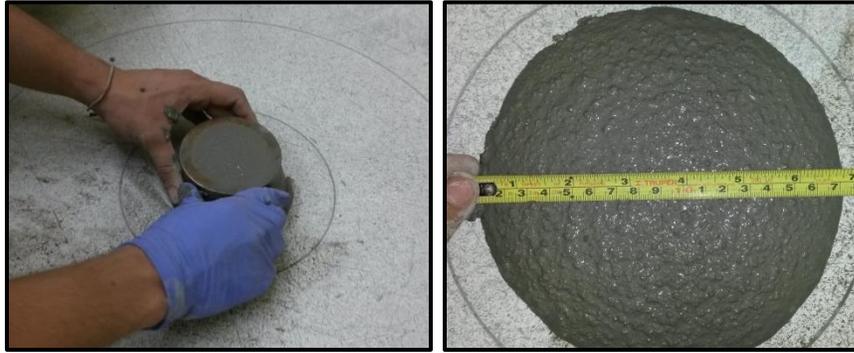


Figura 5.2 - Medición de fluidez de morteros

5.4.1.2. Masa unitaria

La masa unitaria de los morteros se midió utilizando un recipiente cilíndrico de bronce de volumen conocido (Figura 5.3). Se llenó el recipiente en su totalidad, sin compactar el mortero. Se le aplicaron de 10 a 15 golpes con un mazo de goma y posteriormente, se enrasó y se limpió el exterior del recipiente. Se determinó la masa del recipiente lleno con el mortero y se calculó la masa unitaria del mortero con la ecuación (1).

$$M. U. = \frac{m_{recip+mortero} - m_{recip}}{V_{recip}} \quad (1)$$

Donde, $M. U.$ es la masa unitaria, m_{recip} es la masa del recipiente vacío, $m_{recip+mortero}$ es la masa del recipiente lleno con el mortero y V_{recip} es el volumen del recipiente.



Figura 5.3 - Medición de la masa unitaria de morteros

5.4.1.3. Contenido de aire

Se obtuvo el contenido de aire mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM C-185 ^[56]. Se utilizó el mismo recipiente y la misma muestra utilizada para la obtención de la masa unitaria y se calculó el contenido de aire por medio de la ecuación (2).

$$\text{Contenido de aire, \%} = 100[1 - (W_a/W_c)] \quad (2)$$

Donde, W_a es la masa unitaria medida y W_c es la masa unitaria teórica calculada libre de aire.

5.4.1.4. Tiempos de fraguado

Se determinaron los tiempos de fraguado de todas las mezclas estudiadas mediante el método de resistencia a la penetración descrito en la norma ASTM C-403 ^[57].



Figura 5.4- Medición de tiempos de fraguado de acuerdo con ASTM C-403

5.4.2. Estabilidad volumétrica

5.4.2.1. Deformación autógena

Se midió la deformación autógena por el método de prueba descrito en la norma ASTM C-1698 ^[58]. La lectura inicial se tomó al momento del fraguado final de cada mezcla, posteriormente se midió a cada hora en un periodo de 4 a 6 horas. Después se tomaron mediciones a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21 y 28 días.



Figura 5.5- Medición de deformación autógena de acuerdo con ASTM C-1698

5.4.2.2. Contracción por secado

Se midió la contracción por secado siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C-596 ^[59].



Figura 5.6 - Medición de retracción por secado de acuerdo con ASTM C-596

5.4.3. Propiedades en estado endurecido

5.4.3.1. Resistencia a la compresión

Se determinó la resistencia a la compresión usando especímenes cúbicos de 50 mm. Para su fabricación, se llenaron los moldes completamente sin ninguna compactación. Posteriormente se protegieron de la pérdida de humedad cubriéndolos con un plástico y se almacenaron en el cuarto de curado. A las 24 horas de curado, los especímenes fueron desmoldados y se depositaron en agua con hidróxido de calcio para su curado. La resistencia a la compresión se obtuvo a las edades de 3, 7, 21, 28 y 56 días, utilizando 3 especímenes por cada edad.

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo en una máquina universal de la marca INSTRON, siguiendo los requerimientos de la norma ASTM C-109 para ensayos de cubos de 50 mm ^[60].



Figura 5.7 - Máquina universal INSTRON (izq.) y ensayo a compresión de acuerdo a ASTM C-109 (der.)

5.4.3.2. Indicadores de durabilidad

- **Carbonatación**

Para la medición de la profundidad de carbonatación se prepararon especímenes prismáticos con dimensiones de 50×50×250 mm. La prueba se realizó en especímenes con diferentes tiempos de curado: 28 y 56 días. Al final de cada tiempo de curado, los especímenes fueron colocados en una cámara de carbonatación acelerada, bajo las siguientes condiciones: temperatura de $30 \pm 1^\circ\text{C}$, humedad relativa de $60 \pm 10\%$ y concentración de CO_2 del 5%. Las mediciones de profundidad de carbonatación se realizaron a las edades de 7, 14, 28 y 56 días de exposición al CO_2 . Por cada edad se seccionó el prisma a 50 mm de su longitud, el corte se realizó con la ayuda de un mazo y un cincel. Posteriormente, se limpió la superficie seccionada para eliminar el polvo depositado en ella y se roció con un indicador de fenolftaleína. Finalmente, se registró la profundidad de carbonatación como el promedio de las lecturas tomadas de cada lado de la cara seccionada. El resto del espécimen se colocó de vuelta en la cámara de carbonatación para mediciones posteriores.



Figura 5.8 - Cámara de carbonatación acelerada (izq.) y medición de profundidad de carbonatación (der.)

- **Permeabilidad a los iones cloro**

La permeabilidad a los iones cloro de cada mortero se evaluó mediante la carga total pasada durante la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro (RCPT, *siglas en inglés*) de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C-1202 ^[61]. Para esta prueba se fabricaron 6 especímenes cilíndricos por cada mezcla para ser curados a las edades de 28 y de 56 días, tres especímenes por cada edad de curado. Transcurrido el tiempo de curado, se cortaron rodajas de 50 mm de espesor, de la parte media de cada cilindro. Después, se recubrió el perímetro de cada rodaja con resina epóxica e impermeabilizante. Posteriormente se colocaron las rodajas en un desecador y se les aplicó vacío durante 3 horas en seco; después se saturaron las muestras dentro del desecador, introduciendo agua de-aireada, sin permitir la entrada de aire y se aplicó vacío durante una hora más. Al finalizar, se dejó entrar el aire al desecador y se dejaron las rodajas saturadas durante 18 ± 2 horas. Después del acondicionamiento de las muestras se armaron las celdas (Figura 5.9), llenando un lado con una solución del 3% de NaCl (terminal negativa) y el otro con una solución de 0.3N de NaOH (terminal positiva). Finalmente, se conectaron las celdas al aparato PROOVE´it y se aplicó un potencial de 60 V durante 6 horas.

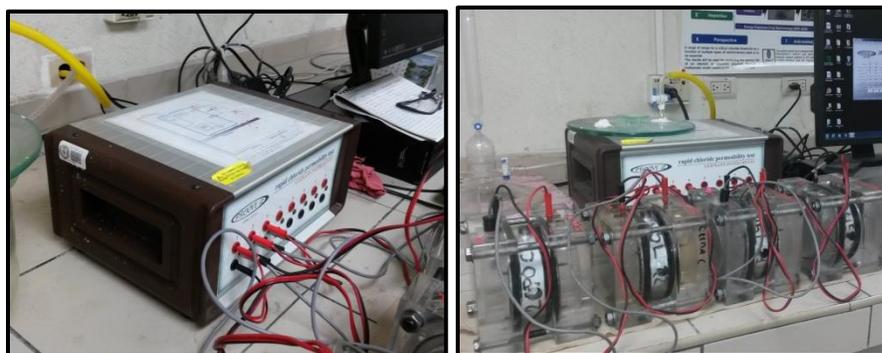


Figura 5.9 - Apartato PROOVE´it (izq.) y celdas (der.) para la prueba RCPT según ASTM C-1202

- **Resistividad eléctrica superficial**

Para la medición de la resistividad eléctrica superficial se utilizó un medidor de resistividad de cuatro puntos de tipo Wenner “Resipod”, de la marca PROCEQ (Figura 5.10), que tiene una separación entre ondas de 38 mm. Para esta prueba se fabricaron 3 especímenes cilíndricos por cada mezcla y se curaron sumergidos en agua con hidróxido de calcio. La medición se llevó a cabo a diferentes edades (1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 y 56 días), para observar el avance de la resistividad con el tiempo de curado. Se registró la resistencia medida por edad como el promedio de 12 mediciones (4 mediciones a 90° por cilindro). La resistividad eléctrica superficial se calculó entonces por la ecuación (3):

$$\rho = R \cdot k \quad (3)$$

En donde R es la resistencia medida y k es el factor de corrección geométrico usado para especímenes cilíndricos descrito en la ecuación (4):

$$k = \frac{2\pi a}{1.10 - \frac{0.730}{d/a} + \frac{7.82}{(d/a)^2}} \quad (4)$$

Esta fórmula es válida solamente cuando $d/a \leq 4$ y $L/a \geq 5$, donde d es el diámetro del cilindro (mm), a es la separación entre las sondas del medidor y L es la altura del cilindro (mm) ^{[62][63]}.



Figura 5.10 - Medidor de resistividad Resipod PROCEQ (izq.) y medición de resistividad eléctrica superficial (der.)

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1.- Caracterización de materiales

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de caracterización realizadas a los diferentes materiales utilizados en esta investigación.

6.1.1.- Cementantes y micro polvo de carbonato de calcio (Polvos)

6.1.1.1.- Densidad

Las densidades del cemento Portland ordinario (CPO 40), la ceniza volante (CV) y el micro-polvo de carbonato de calcio (CaCO_3) se muestran en la Tabla 6.1

Tabla 6.1 - Densidad de los materiales cementantes y el micro-polvo de carbonato de calcio

Material	Densidad (g/cm^3)
CPO 40	3.10
CV	2.03
CaCO_3	2.68

6.1.1.2.- Distribución de tamaño de partículas

En la Tabla 6.2 se muestran los valores de D_{10} , D_{50} y D_{90} . Estos parámetros indican que el 10%, el 50% y el 90% del volumen total de partículas, tienen un tamaño de partícula inferior al indicado por cada parámetro, respectivamente. Se puede observar que las partículas de ceniza volante son aproximadamente 4 veces más gruesas que las del cemento Portland; mientras que las partículas del micro-polvo de carbonato de calcio son hasta 11 veces más finas que las del cemento Portland.

Tabla 6.2 - Tamaños de partícula por los que pasan 10%, 50% y 90% del volumen total del material

Material	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)
CPO	3	18.4	46.2
CV	14	71.2	242.1
CaCO_3	0.6	1.7	4.7

En la Figura 6.1 se muestra un análisis completo de la distribución de tamaño de las partículas de los tres polvos analizados.

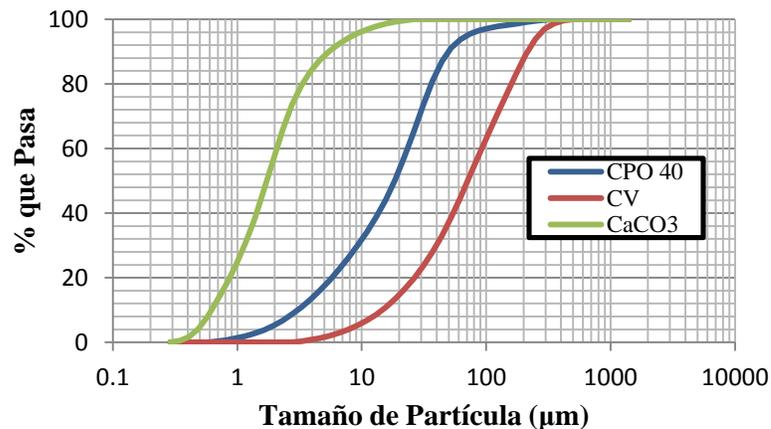


Figura 6.1 - Distribución de tamaño de partículas de CPO 40, CV y CaCO_3

6.1.1.3.- Composición química

En la Tabla 6.3 se muestra la composición química de los cementantes y del micro-polvo de carbonato de calcio. La suma de los óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) de la ceniza volante es mayor que el mínimo de 70% especificado por la norma ASTM C-618 ^[41] para clasificarla como Clase F.

Tabla 6.3 - Composición química de los materiales cementantes y micro-polvo de carbonato de calcio

Compuesto	CPO	CV	CaCO_3^*
SiO_2 , %	17.66	67.48	0.2
Al_2O_3 , %	4.72	23.94	
Fe_2O_3 , %	2.26	4.63	
CaO , %	63.68	1.76	
MgO , %	1.2	1.16	
SO_3 , %	5.12	-	
Na_2O , %	0.66	1.14	
K_2O , %	0.74	0.99	
TiO_2 , %	0.24	0.94	
P_2O_5 , %	0.09	0.03	
MnO , %	0.08	-	
Suma ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)		96.05	
CaCO_3			>99%

* Valores tomados de la ficha técnica del Omyacarb® UF – FL

6.1.1.4.- Fases minerales

Las fases minerales obtenidas por DRX se muestran en las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4, que corresponden al cemento Portland ordinario, la ceniza volante y el micro-polvo de carbonato de calcio, respectivamente.

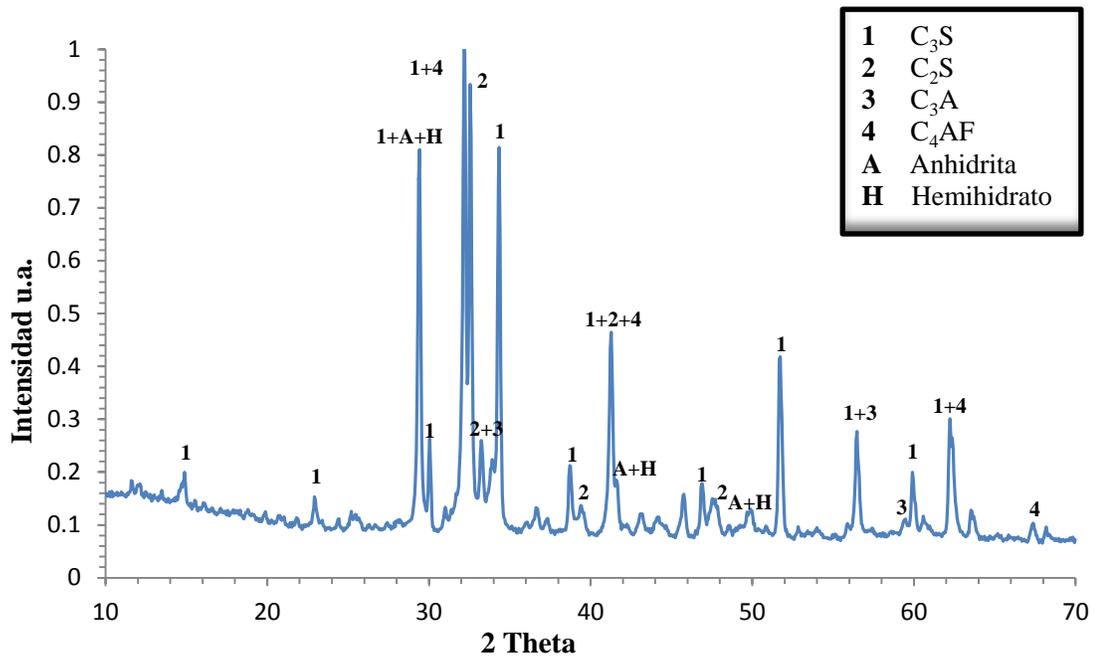


Figura 6.2 - Difracción de rayos "X" del cemento Portland ordinario

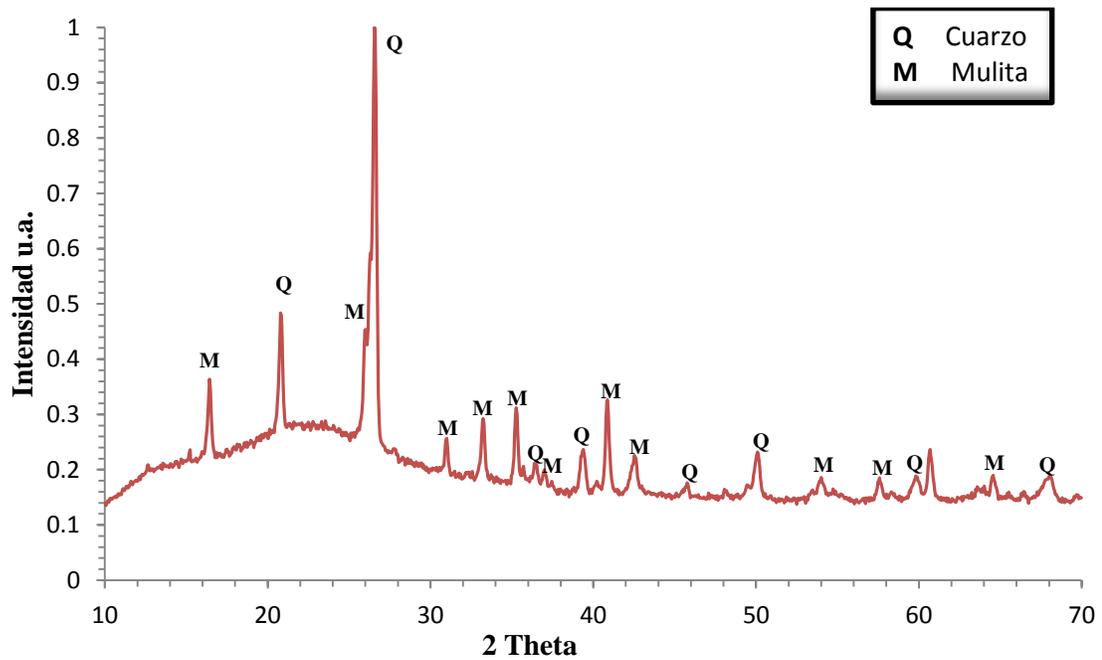


Figura 6.3 - Difracción de rayos "X" de la ceniza volante

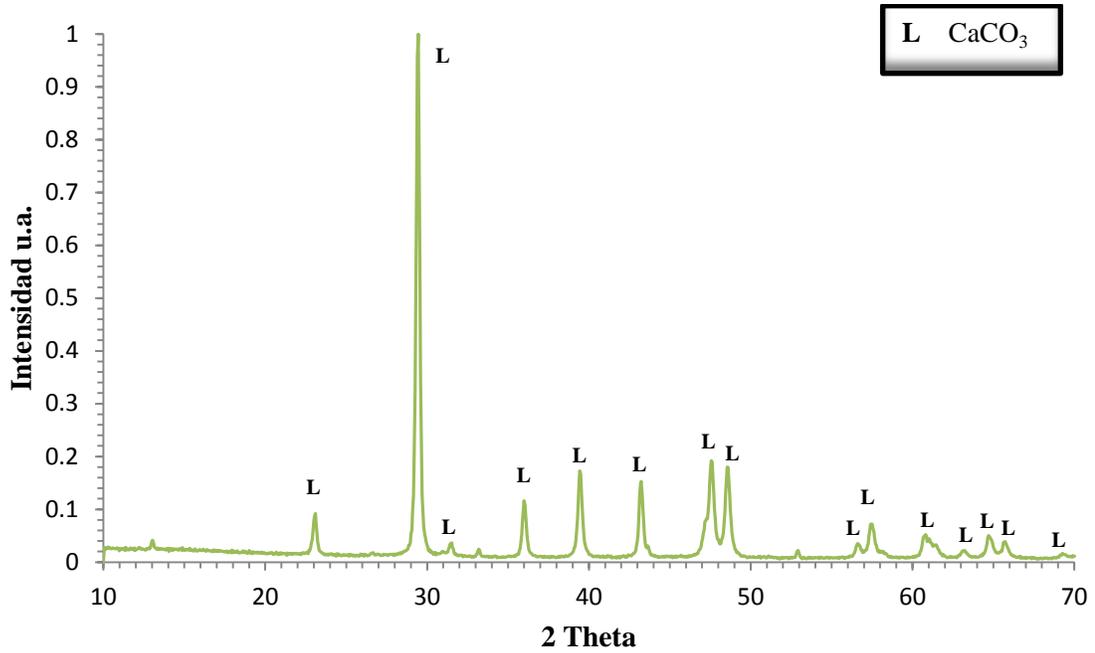


Figura 6.4 - Difracción de rayos "X" del micro-polvo de carbonato de calcio

En la Tabla 6.4 se muestra el desglose de las principales fases minerales que componen a cada material.

Tabla 6.4 - Nomenclatura y composición química de las fases minerales

Material	Fases Minerales	
	Nomenclatura	Composición Química
CPO	C ₃ S	3CaO·SiO ₂
	C ₂ S	2CaO·SiO ₂
	C ₃ A	3CaO·Al ₂ O ₃
	C ₄ AF	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃
	Anhidrita	CaO·SO ₃
	Hemihidrato	CaO·SO ₄ ·1 1/2 H ₂ O
CV	Cuarzo	α-SiO ₂
	Mulita	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂
CaCO ₃	Calcita	CaCO ₃

6.1.1.5.- Morfología y Composición Elemental

En las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se muestran las imágenes obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido, en las cuales se puede observar la morfología del cemento Portland ordinario, la ceniza volante y el micro-polvo de carbonato de calcio, respectivamente.

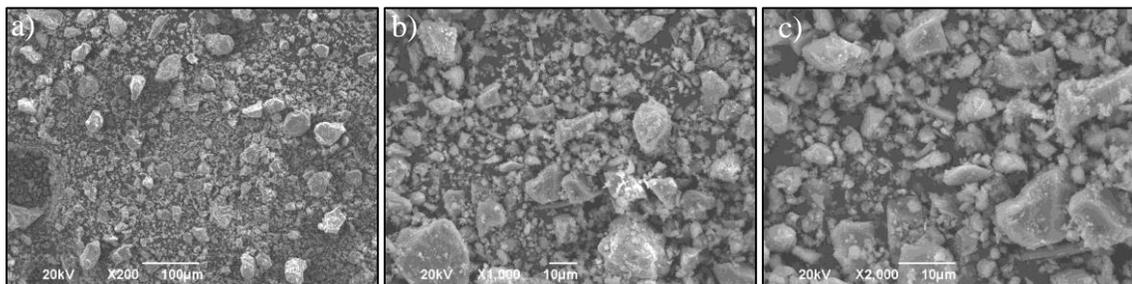


Figura 6.5 - Micrografía del cemento Portland ordinario, con aumento: a) $\times 200$, b) $\times 1000$, c) $\times 2000$

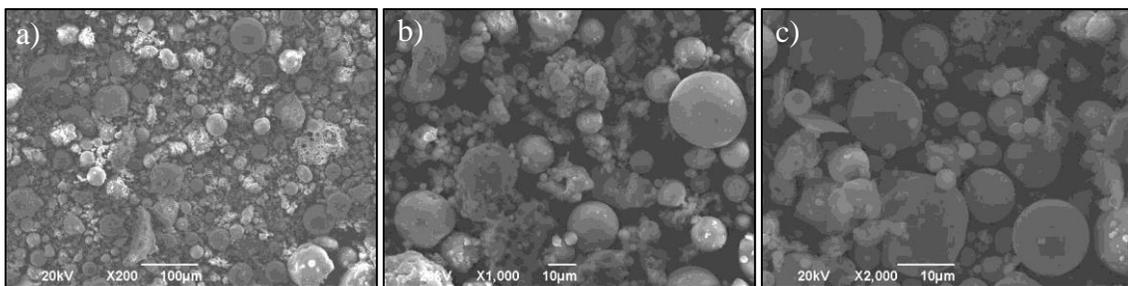


Figura 6.6 - Micrografía de la ceniza volante, con aumento: a) $\times 200$, b) $\times 1000$, c) $\times 2000$

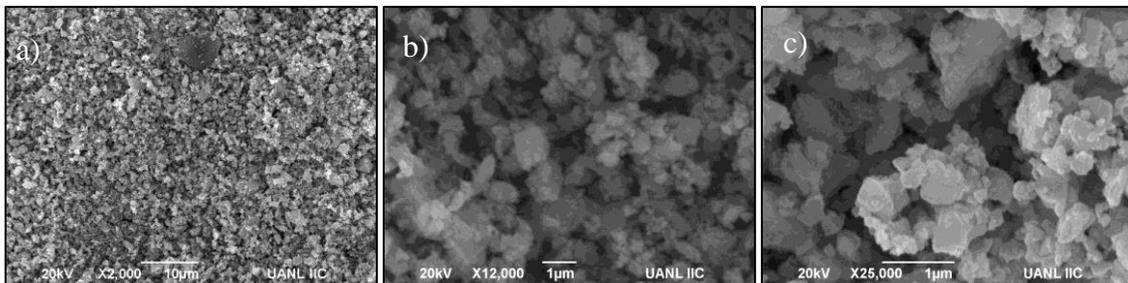
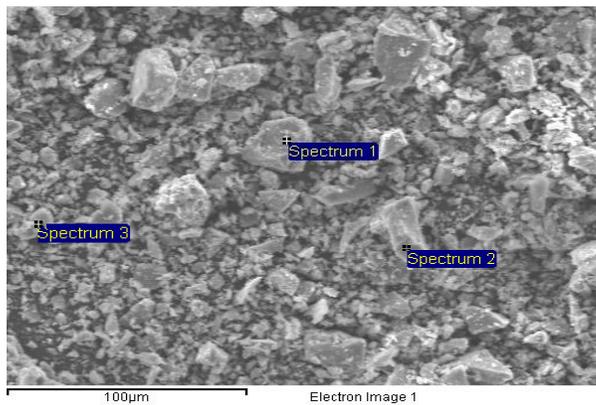
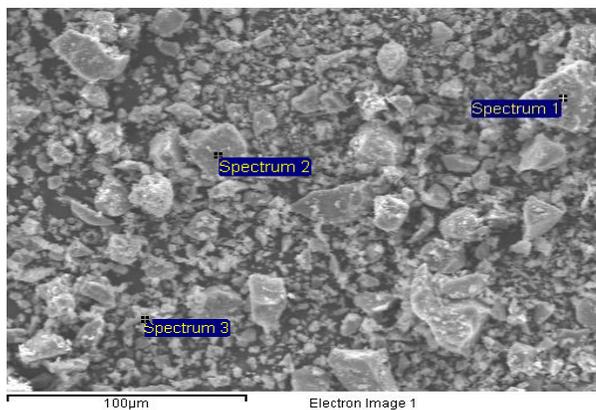


Figura 6.7 - Micrografía del micro-polvo de carbonato de calcio, con aumento: a) $\times 2000$, b) $\times 12000$, c) $\times 25000$

Los resultados de la Espectroscopía de Dispersión de Energía se muestran en las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 para el cemento Portland (CPO), la ceniza volante (CV) y el micro-polvo de carbonato de calcio (CaCO_3), respectivamente. Se puede observar que los elementos principales en el CPO son: Ca, Al, Si y O, en menor cantidad se encuentran Mg, Fe, C, S y K. En la CV los elementos principales son Si, Al, C y O, también se encontraron Fe, Mg, Na, Nb, K, S y Ti en menores cantidades. Por otro lado, en el micro-polvo de CaCO_3 solo se encontraron los elementos C, Ca y O.

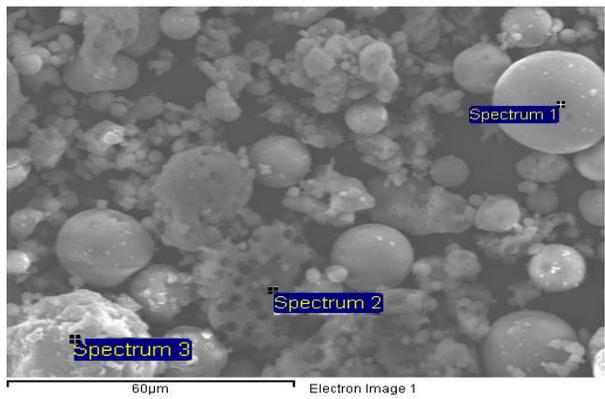


Elemento	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	% Peso		
Ca	53.98	46.8	38.48
Al	11.28	3.03	13.38
Si	2.4	9.96	1.88
O	23.14	34.35	36.4
Mg	0.75	0.84	0.66
Fe	8.45	2.14	7.68
C	-	2.88	-
S	-	-	0.91
K	-	-	0.61

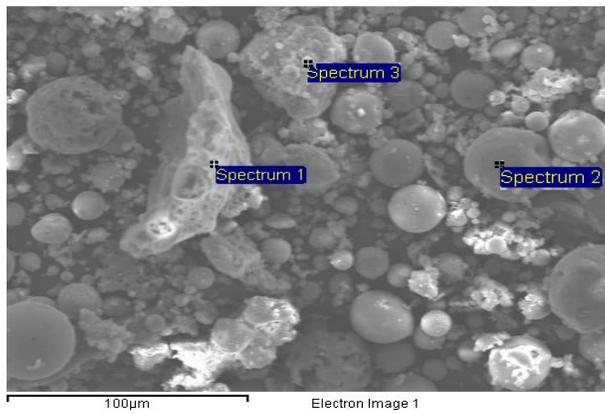


Elemento	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	% Peso		
Ca	35.99	71.40	35.51
Al	4.61	-	5.76
Si	9.92	7.49	2.86
O	45.34	21.11	45.58
Mg	0.71	-	1.10
Fe	2.93	-	8.36
C	-	-	-
S	0.49	-	0.45
K	-	-	0.40

Figura 6.8 - Composición elemental del cemento Portland ordinario por EDS

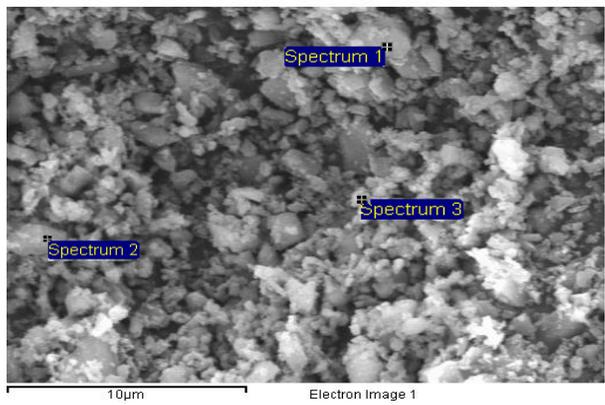


Elemento	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	% Peso		
Al	23.50	0.87	3.77
Si	26.62	3.62	50.09
O	43.91	11.81	46.14
Fe	5.97	-	-
C	-	83.33	-
S	-	0.37	-



Elemento	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	% Peso		
Al	19.35	11.66	17.12
Si	27.99	30.01	29.10
O	63.38	51.94	43.65
Fe	1.09	1.89	3.06
K	1.16	2.17	0.47
Na	0.72	-	-
Mg	-	0.84	-
Nb	-	1.50	2.10
Ti	-	-	2.10

Figura 6.9 - Composición elemental de la ceniza volante por EDS



Elemento	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
	% Peso		
C	40.44	34.34	37.95
Ca	15.92	18.75	17.65
O	43.63	46.91	44.39

Figura 6.10 - Composición elemental del micro-polvo de carbonato de calcio por EDS

6.1.1.6.- Índice de actividad a la resistencia de la ceniza volante

En la Tabla 6.5 se presenta el índice de actividad a la resistencia de la Ceniza Volante, a la edad de 7 y 28 días. El agua necesaria para obtener la misma fluidez que la mezcla de control descrita en ASTM C 311, fue de 260 mL. El índice de actividad a la resistencia, obtenido por esta ceniza, resultó menor que el mínimo de 75% estipulado por la norma ASTM C 618 ^[41].

Tabla 6.5 - Índice de actividad a la resistencia de la ceniza volante

Edad (días)	7	28
IR (%)	71	71

6.1.2.- Agregados

6.1.2.1. Densidad y absorción

Las densidades y absorciones de los agregados fino y grueso se presentan en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 - Densidad y absorción de los agregados fino y grueso

Agregado	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
Fino	2.64	2.0
Grueso	2.72	0.4

6.1.2.2. Análisis granulométrico

Los análisis granulométricos del agregado fino y del agregado grueso utilizados en esta investigación se muestran en las Tablas 6.7 y 6.8, respectivamente.

Tabla 6.7 - Análisis granulométrico del agregado fino

Malla	Tamaño (mm)	% Pasa
3/8''	9.5	100%
N° 4	4.75	100%
N° 8	2.36	91%
N° 16	1.18	63%
N° 30	0.594	40%
N° 50	0.3	25%
N° 100	0.149	15%
N° 200	0.074	11%
Pasa 200	< 0.074	0%

Tabla 6.8 - Análisis granulométrico del agregado grueso

Malla	Tamaño (mm)	% Pasa
1 1/2''	38.1	100%
1''	25.4	100%
3/4''	19.05	96%
1/2''	12.7	40%
3/8''	9.53	13%
N° 4	4.75	1%
N° 8	2.36	0%
Pasa 8	< 2.36	0%

6.1.3.- Aditivos químicos

6.1.3.1.- Densidad y contenido de sólidos

La densidad y el contenido de sólidos de los aditivos utilizados en esta investigación se muestran en la Tabla 6.9

Tabla 6.9 - Densidad y contenido de sólidos de los aditivos químicos

Aditivo	Densidad (g/cm ³)	Contenido de Sólidos (%)
Plastol Precast	1.10	42.1
Visctrol	1.23	47.6

6.2. Resultados experimentales

A continuación se presentan los resultados de las diferentes propiedades evaluadas a las mezclas de mortero estudiadas en esta investigación.

6.2.1. Propiedades en estado fresco

Un resumen de las propiedades en estado fresco de todas las mezclas estudiadas en esta investigación se muestra en la Tabla 6.10

Tabla 6.10 - Propiedades en estado fresco para los morteros estudiados

REFERENCIA				
Propiedades	REF			
Fluidez (cm)	17.0			
M.U. (kg/m ³)	2188			
% Aire	3.0			
SERIE A				
Propiedades	1CPO-CV	1CPO-CV-5L	1CPO-CV-10L	1CPO-CV-15L
Fluidez (cm)	16.0	17.0	17.0	16.5
M.U. (kg/m ³)	2070	2099	2122	2130
% Aire	9.9	8.9	8.1	8.0
SERIE B				
Propiedades	2CPO-CV	2CPO-CV-5L	2CPO-CV-10L	2CPO-CV-15L
Fluidez (cm)	17.0	17.0	17.0	16.5
M.U. (kg/m ³)	2061	2091	2111	2130
% Aire	9.1	8.1	7.4	6.8
SERIE C				
Propiedades	3CPO-CV	3CPO-CV-5L	3CPO-CV-10L	3CPO-CV-15L
Fluidez (cm)	18.0	18.0	17.0	17.5
M.U. (kg/m ³)	2036	2081	2124	2147
% Aire	9.1	7.3	5.7	4.9

6.2.1.1. *Fluidez*

Para todas las mezclas se fijó una fluidez (extensibilidad) objetivo de 17 ± 1 cm, correspondiente a la del mortero de referencia. Para lograr esta fluidez se variaron las dosificaciones del aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante (HWRA).

La dosificación del HWRA para la mezcla de referencia fue de 6.2 ml/kgCm, mientras que en las series A y B la demanda disminuyó a 5.5 y 5.4 ml/kgCm, respectivamente. Este efecto puede atribuirse a la sustitución del cemento Portland por la ceniza volante, debido a que las partículas redondeadas de la ceniza volante reducen la fricción interna en los morteros, lo que causa que fluyan con mayor facilidad^[64]. Por otra parte, en la Serie C, la sustitución de 60% en volumen del cemento Portland por ceniza volante condujo a un incremento en la dosificación del HWRA (6.2 ml/kgCm) con respecto a las dosificaciones de las series A y B, lo cual puede atribuirse a que incrementos significativos en el volumen de ceniza volante pueden conducir a incrementos en la estabilidad y cohesividad de la mezcla, lo cual puede causar una reducción en la fluidez. Por otro lado, la adsorción de la ceniza volante también puede estar contribuyendo ya que al aumentar la dosificación de esta puzolana, la demanda de agua puede aumentar y la trabajabilidad disminuir^[65].

La sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio no tuvo efecto en la demanda de HRWA. Es decir, las dosificaciones de HRWA para todas las mezclas de una misma serie permanecieron constantes.

6.2.1.2. Masa unitaria

Las masas unitarias, tanto teórica y medida, disminuyeron conforme se sustituyó el cemento Portland por ceniza volante; esto se esperaba debido a la diferencia en las densidades de estos materiales. Mientras que en cada serie, al sustituir la ceniza volante por el micro-polvo de carbonato de calcio se observó un aumento en la masa unitaria; conforme más micro-polvo de carbonato de calcio se agregaba como sustitución. Esto se debe, de igual manera, a que la densidad del micro-polvo es mayor que la de la ceniza volante. En la figura 6.11 se observa el efecto de las sustituciones de micro polvo de carbonato de calcio en la masa unitaria medida de cada serie.

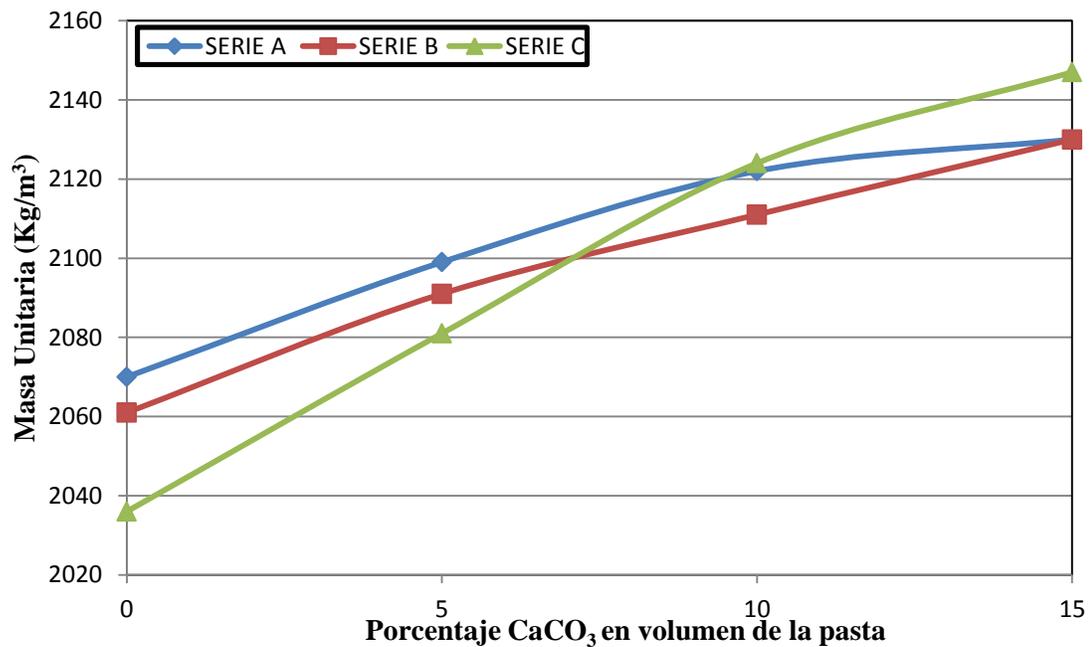


Figura 6.11 - Efecto de las sustituciones de micro-polvo de CaCO₃ en la masa unitaria medida

6.2.1.3. Contenido de Aire

Se pudo observar un aumento en el contenido de aire al sustituir el cemento Portland por la ceniza volante. Este aumento fue similar para las tres sustituciones de ceniza volante (30, 45 y 60%). Sin embargo, el contenido de aire disminuyó dentro de cada serie, con las sustituciones de micro-polvo de carbonato de calcio, como se puede observar en la Figura 6.12. Esto pudo ser causado por el efecto de relleno (“filler”) que aporta el micro-polvo de carbonato de calcio que debido a su pequeño tamaño de partícula, mejora el empaquetamiento de los polvos, lo cual causa una reducción en la porosidad intersticial [66]

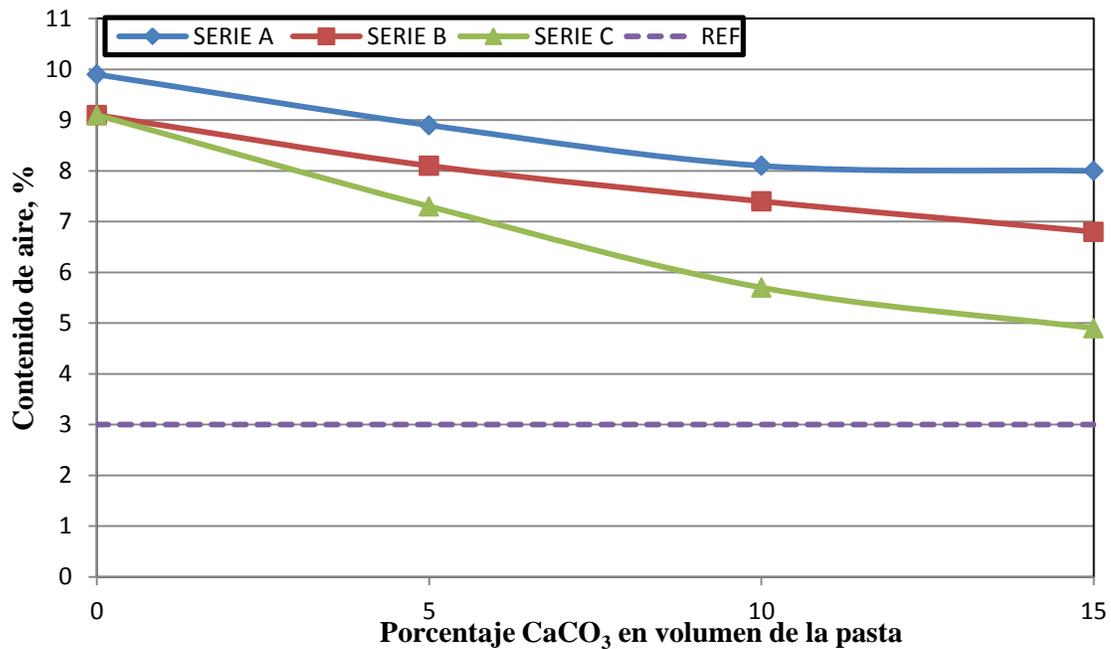


Figura 6.12 - Efecto de las sustituciones de micro polvo de CaCO_3 en el contenido de aire

6.2.1.4. Tiempos de fraguado

Los resultados de los tiempos de fraguado para la referencia y las tres series de mortero se muestran en las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15, que corresponden a la serie A, B y C, respectivamente. Así mismo, para fines de comparación, en la Figura 6.16 se muestran los tiempos de fraguado de todas las mezclas estudiadas. Se sabe que las sustituciones de ceniza volante producen retardos en los tiempos de fraguado. Al igual que en investigaciones previas ^[67], los tiempos de fraguado más largos se tuvieron para los morteros con mayores sustituciones de ceniza volante. Para las sustituciones de 30 y 45% de ceniza volante (1CPO-CV y 2CPO-CV) se observó un retardo en los tiempos de fraguado finales, de aproximadamente 30 minutos, con respecto a la referencia, mientras que con la sustitución de 60% de ceniza volante (3CPO-CV) se presentó un retardo de hasta 85 minutos.

Por otra parte, se observó que al sustituir la ceniza volante por el micro-polvo de carbonato de calcio hubo una reducción en los retardos ocasionados por la ceniza volante. Para las Series A y B, las sustituciones de un 5% de micro-polvo bastaron para obtener tiempos de fraguado similares a los de la referencia. Sustituciones más altas llevaron a tiempos de fraguado menores que los de la referencia. Estos resultados fueron similares a los reportados en investigaciones previas, en las cuales se utilizó polvo de carbonato de calcio en mezclas ternarias con ceniza volante y cemento Portland ^{[26]-[36]}. La aceleración del fraguado se atribuye al efecto de relleno (“filler”) y al aumento de centros de nucleación que se presentan al incorporar el micro-polvo de carbonato de calcio a la mezcla, debido a que tiene un tamaño de partícula mucho menor que el del cemento Portland ordinario (Figuras 6.5 y 6.7).

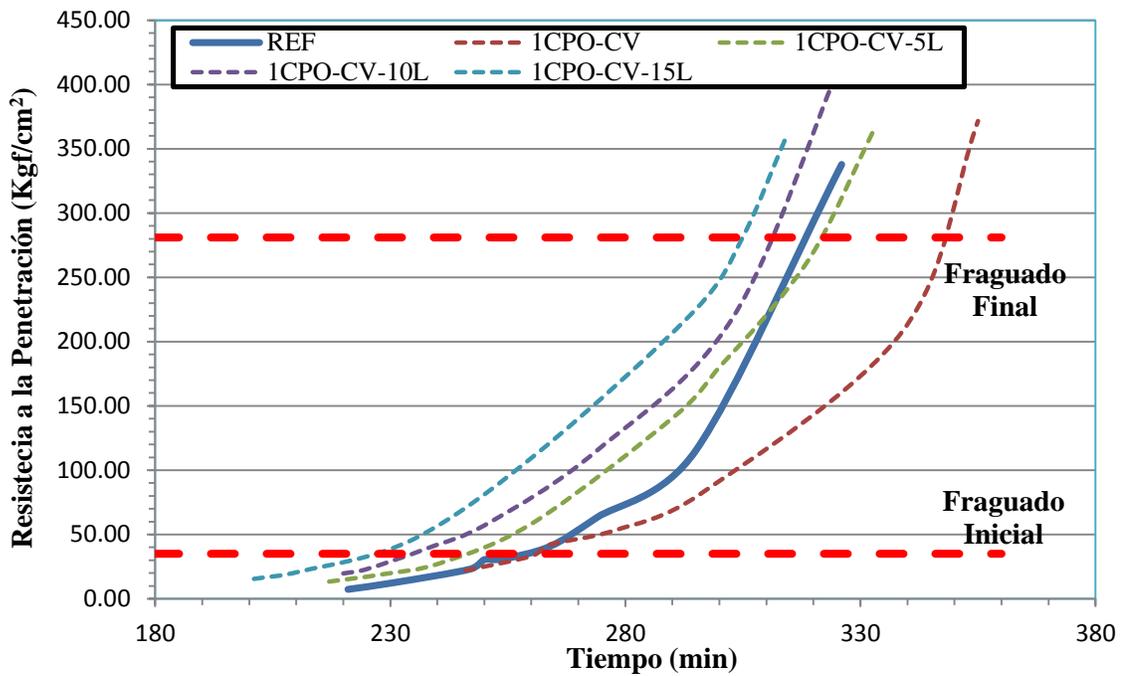


Figura 6.13 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie A

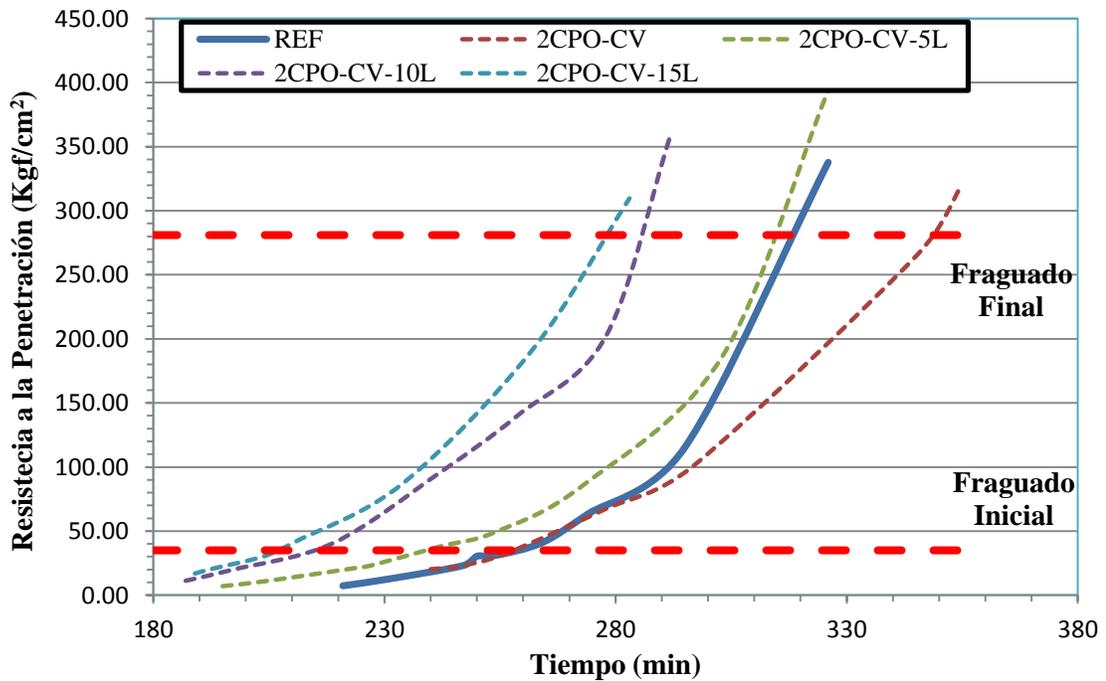


Figura 6.14 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie B

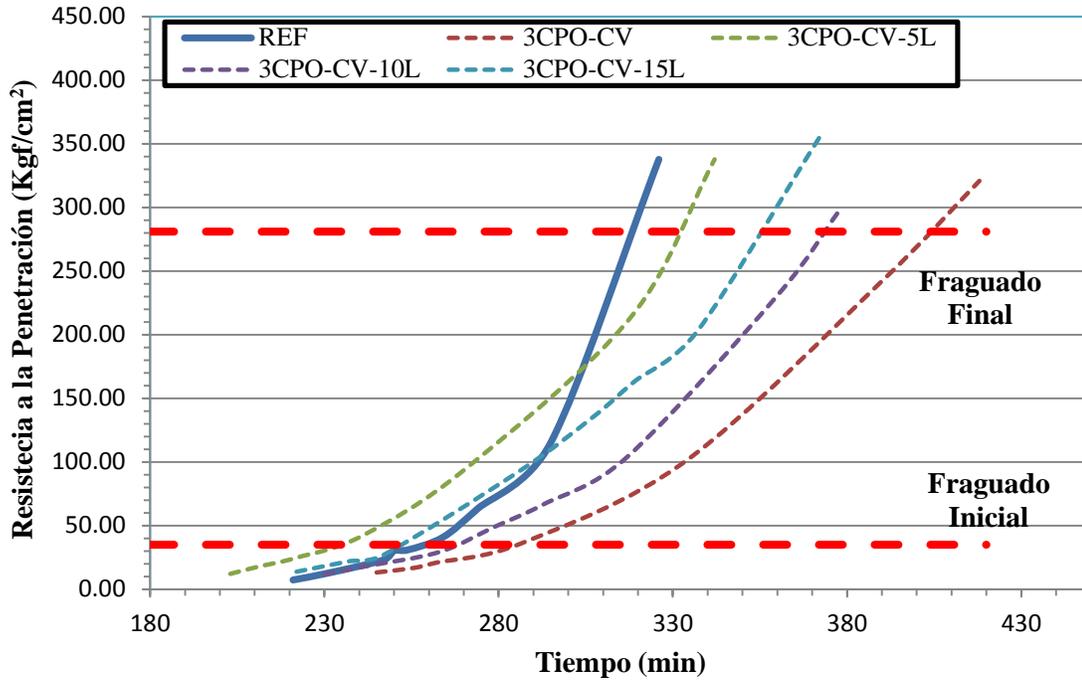


Figura 6. 15 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Serie C

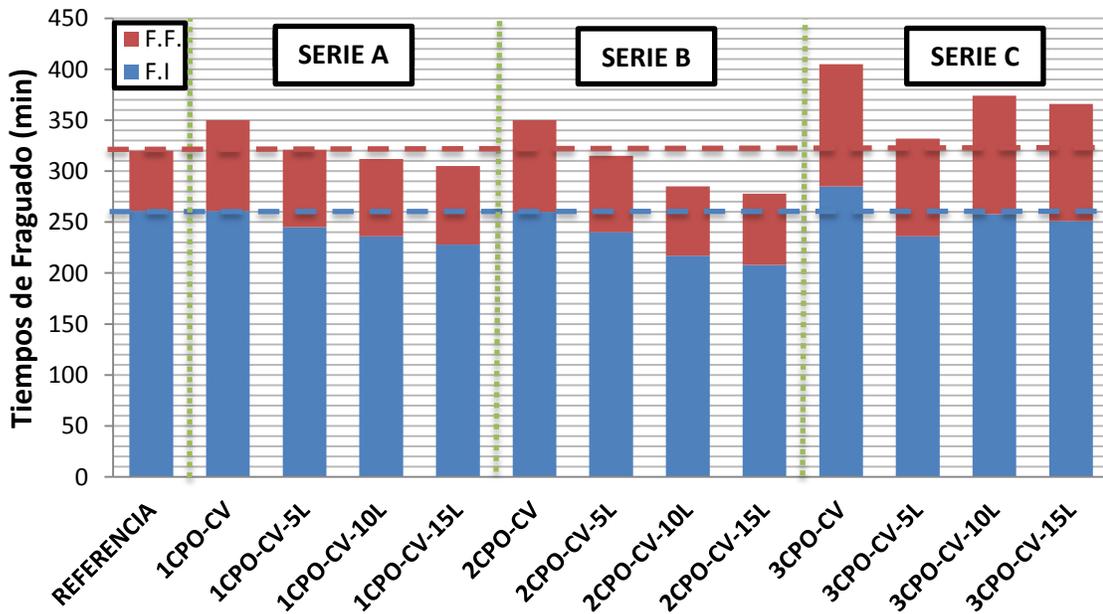


Figura 6.16 - Tiempos de fraguado (ASTM C 403) de la Referencia y las series A, B y C

6.2.2. Estabilidad volumétrica

6.2.2.1. Deformación autógena

La deformación autógena consta de dos partes: contracción autógena, causada por la auto-deseccación y expansión autógena, causada por algunas reacciones de hidratación que producen un aumento de volumen a edades tempranas (por ejemplo, formación de etringita, formación de cristales de hidróxido de calcio y/o el desplazamiento del agua por el gel de los productos de hidratación), siendo la primera la más dominante ^[69].

Los resultados de la deformación autógena total de las mezclas estudiadas se muestran en la Tabla 6.11, donde el signo negativo corresponde a la contracción. Además, en las Figuras 6.17, 6.18 y 6.19 se muestran las deformaciones autógenas medidas contra el tiempo, correspondientes a las series A, B y C, respectivamente. Los resultados muestran que entre más cemento Portland se sustituya por la ceniza volante o por alguna combinación de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio, la contracción autógena disminuye considerablemente. La menor contracción observada en cada una de las series se presentó al sustituir la ceniza volante por un 5% de micro-polvo de carbonato de calcio; es decir, en las mezclas 1CPO-CV-5L, 2CPO-CV-5L y 3CPO-CV-5L. La reducción en el contenido de cemento Portland ayudó a disminuir la auto-deseccación en las mezclas y consecuentemente, como era de esperarse, la contracción.

También se observó que en las mezclas con mayores contenidos de ceniza volante (2CPO-CV y 3CPO-CV) se presentó expansión en las primeras horas después del fraguado final, que puede ser causado por la formación de etringita y/o la re-absorción de

agua de sangrado ^{[70][71]}. Así mismo, la causa de la reducción en la contracción total de las mezclas de ceniza volante pudo deberse al retraso en la hidratación originado por puzolana y por tener un tamaño de partícula grueso ^{[72][73]}, además de la reducción en la auto-deseccación, como se mencionó anteriormente.

Por otra parte, estudios previos han demostrado que la incorporación de polvo de carbonato de calcio también puede producir expansión autógena, debido a la absorción de agua por parte del polvo y que este proceso está influenciado por su finura. Sin embargo, cuando el agua es absorbida por las fases anhidras se puede detonar una tensión capilar generada por los meniscos del agua en los poros, lo que ocasionará contracciones ^{[74][75]}. Otros autores también atribuyen esta expansión a la formación de cristales de hidróxido de calcio y/o etringita y carboaluminato ^{[69][76]}.

Tabla 6.11 - Deformación autógena total de las mezclas estudiadas

Serie	Mezcla	Deformación autógena a los 28 días ($\mu\text{m/m}$) [*]	% ₁ ^{**}
REF	REFERENCIA	-378	0
A	1CPO-CV	-230	39
	1CPO-CV-5L	-146	61
	1CPO-CV-15L	-192	49
B	2CPO-CV	-135	64
	2CPO-CV-5L	-82	78
	2CPO-CV-15L	-157	58
C	3CPO-CV	-60	84
	3CPO-CV-5L	-53	86
	3CPO-CV-15L	-123	67

* Promedio de 3 mediciones

** Porcentaje de reducción de contracción con respecto al mortero de referencia

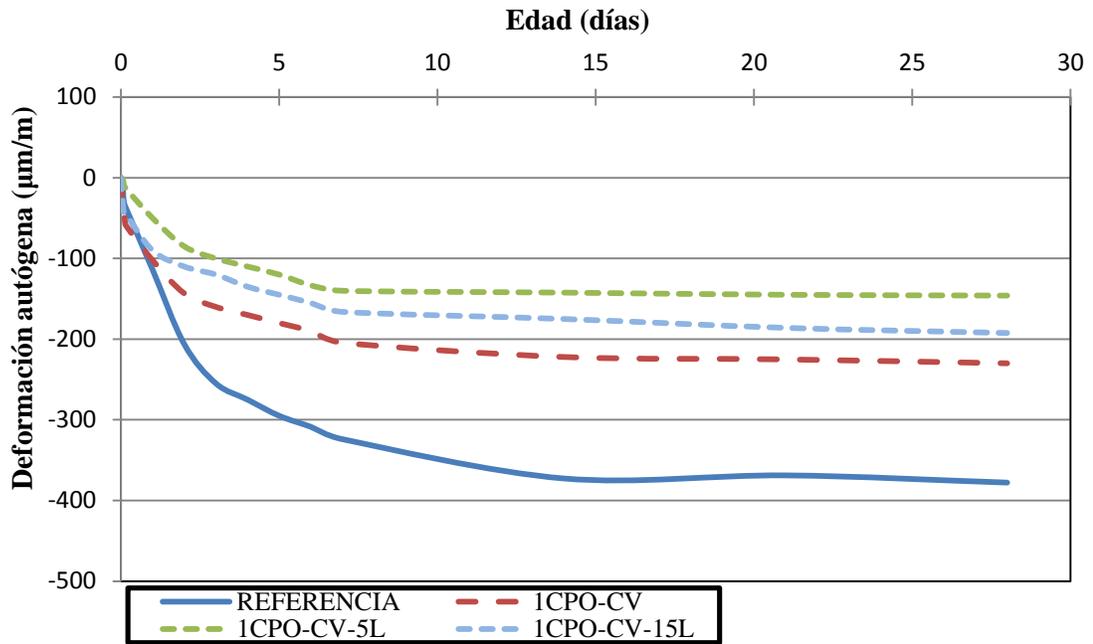


Figura 6.17 - Deformación autógena de la Serie A

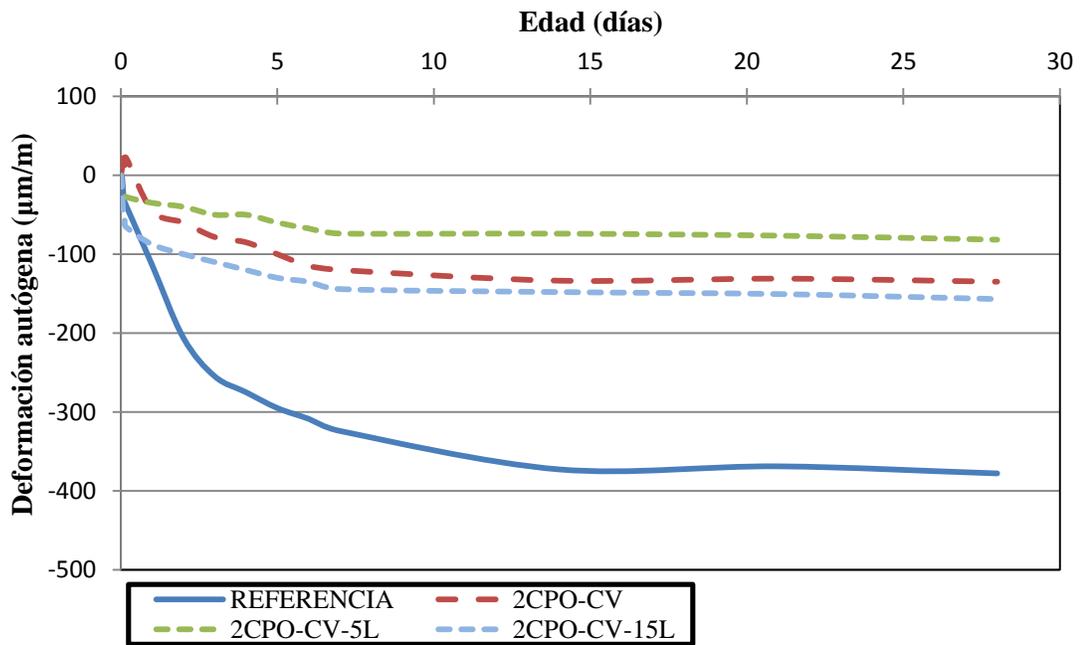


Figura 6.18 - Deformación autógena de la Serie B

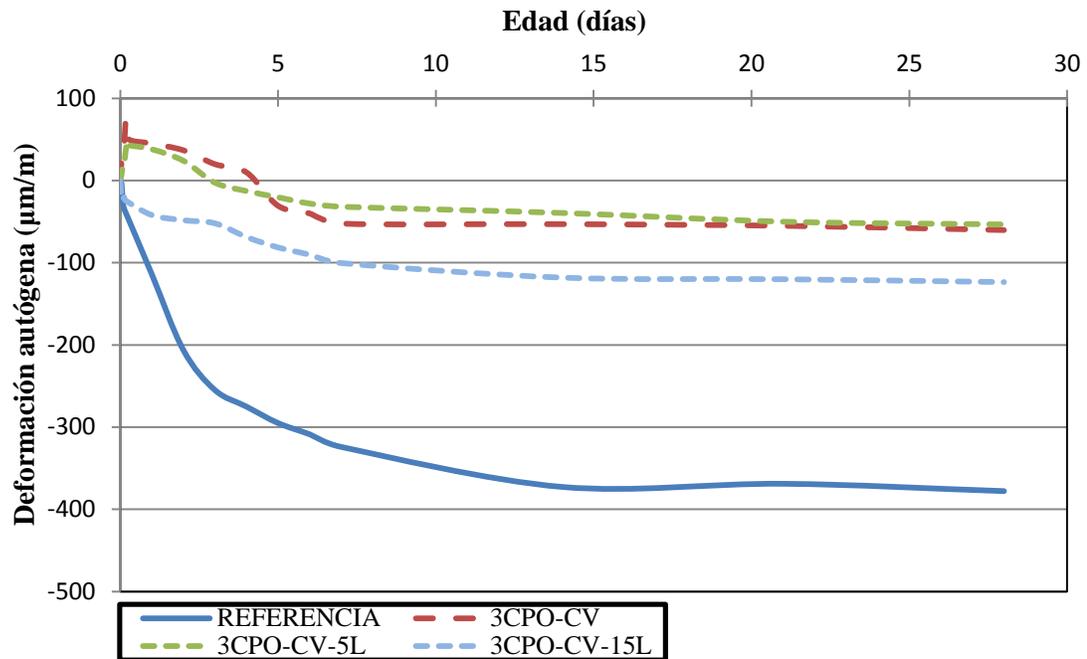


Figura 6.19 - Deformación autógena de la Serie C

6.2.2.2. Contracción por secado

Cuando un concreto se expone a un ambiente de baja humedad se presenta la contracción por secado, que es el cambio de volumen debido a la pérdida de agua por evaporación. La velocidad de evaporación depende de los siguientes factores: la humedad relativa, la temperatura, la relación agua-cementante (o relación agua-polvos) y el tamaño y forma del espécimen. El agua que se pierde primero es la depositada en los poros capilares grandes del espécimen ($> 50\text{nm}$ de diámetro), pero esta pérdida no causa un cambio de volumen significativo. Sin embargo, al continuar el secado, se pierde el agua absorbida por la red de poros capilares pequeños ($< 50\text{nm}$ de diámetro), lo que ocasiona aumentos en las tensiones capilares, conduciendo consecuentemente a la contracción. El uso de aditivos minerales modifica la estructura del poro y por consiguiente, la contracción por

secado. Partículas más finas causarían un refinamiento de poros debido al efecto de relleno, al igual que la actividad puzolánica, lo que ocasionará contracciones mayores. Por otro lado, partículas más gruesas darán lugar a poros capilares más grandes (>50 nm) y la contracción por secado disminuirá ^[77].

Los resultados de la contracción por secado a la edad de 28 días se muestran en la Tabla 6.12. Mientras que en las Figuras 6.20, 6.21 y 6.22 para las Series A, B y C respectivamente, se muestra el desarrollo en el tiempo de prueba de la contracción por secado. Los resultados muestran que conforme más cemento Portland fue sustituido por las combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio, la contracción se redujo, en promedio, aproximadamente 18, 31 y 39%, para las Series A, B y C, respectivamente.

La reducción de la contracción puede atribuirse principalmente a las sustituciones de ceniza volante, ya que su tamaño promedio de partícula es cuatro veces mayor que el del cemento Portland ordinario, lo que sugiere que la red de poros está compuesta por poros de diámetros mayores que 50nm; por lo tanto, la cantidad de poros capilares menores que 50 nm presentes en las mezclas debe ser menor y consecuentemente, también las tensiones capilares ^{[77][78]}.

También se observó que hubo un ligero aumento en la contracción por secado al sustituir la ceniza volante por el micro-polvo de carbonato de calcio. Este aumento en la contracción fue más significativo en la Serie C, donde se utilizó más cantidad de ceniza

volante. Para las Series A y B, este aumento de la retracción es casi incipiente. Estos ligeros aumentos se le atribuyeron al posible refinamiento de poros capilares, debido al efecto de relleno (“filler”) del micro-polvo de carbonato de calcio.

Tabla 6.12 - Contracción por secado a los 28 días de las mezclas estudiadas

Serie	Mezcla	Retracción por secado a los 28 días* ($\mu\text{m}/\text{m}$)	% ₁ **
REF	REFERENCIA	-871	0
A	1CPO-CV	-724	17
	1CPO-CV-5L	-709	19
	1CPO-CV-10L	-712	18
	1CPO-CV-15L	-719	17
	2CPO-CV	-591	32
B	2CPO-CV-5L	-600	31
	2CPO-CV-10L	-622	29
	2CPO-CV-15L	-620	29
	3CPO-CV	-480	45
C	3CPO-CV-5L	-543	38
	3CPO-CV-10L	-546	37
	3CPO-CV-15L	-580	33

* Promedio de 3 mediciones

** Porcentaje de reducción de contracción por secado con respecto al mortero de referencia

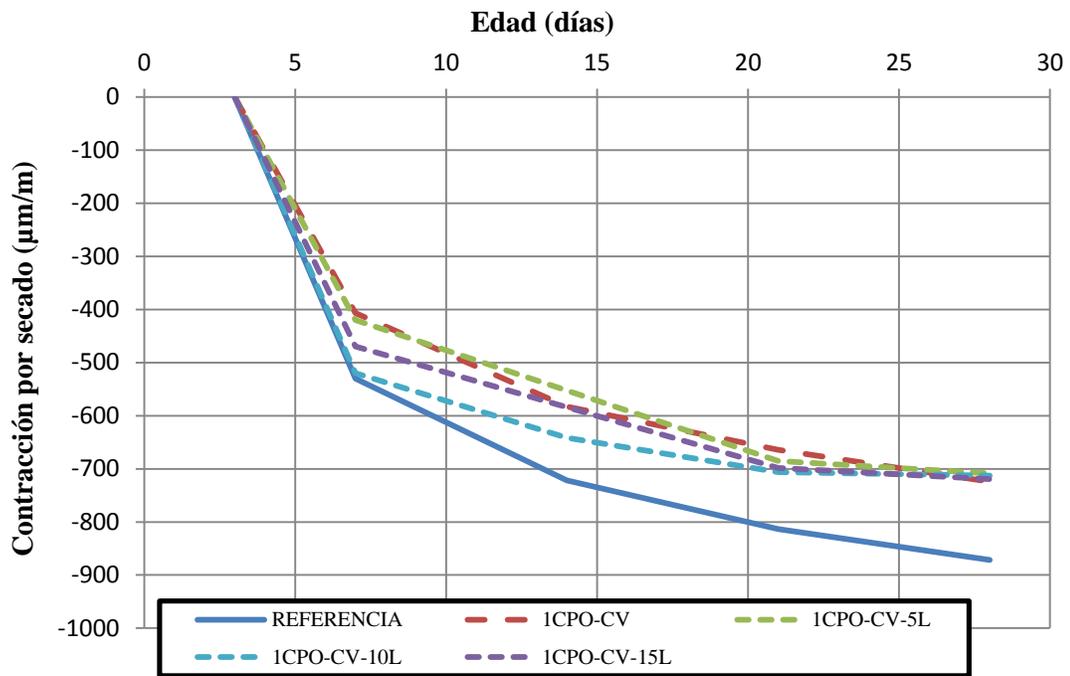


Figura 6.20 - Contracción por secado de la Serie A

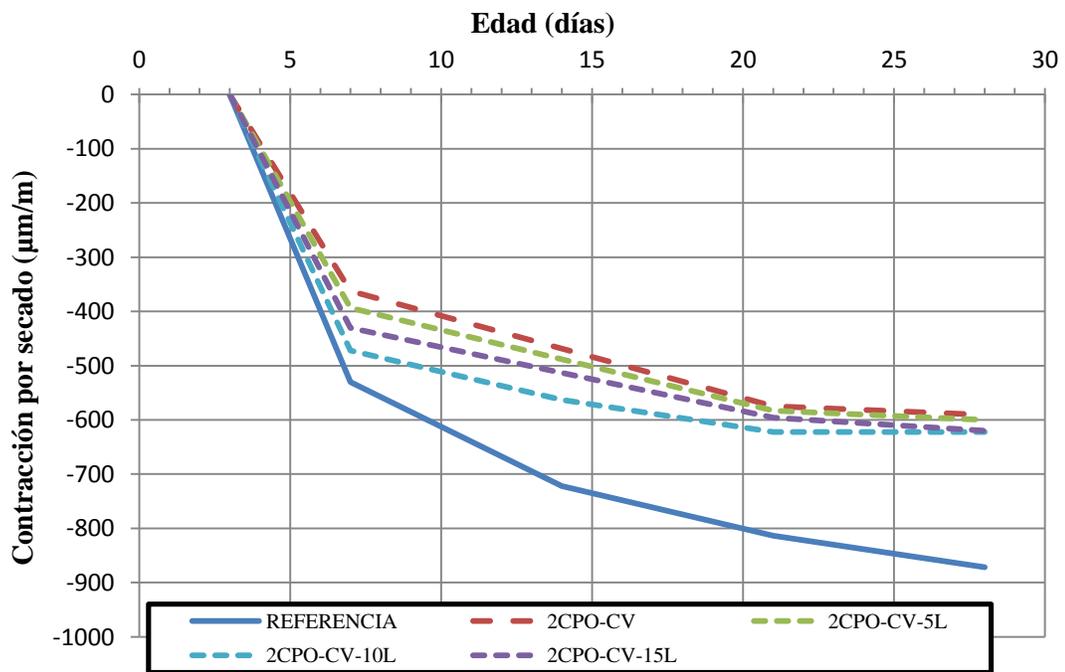


Figura 6.21 - Contracción por secado de la Serie B

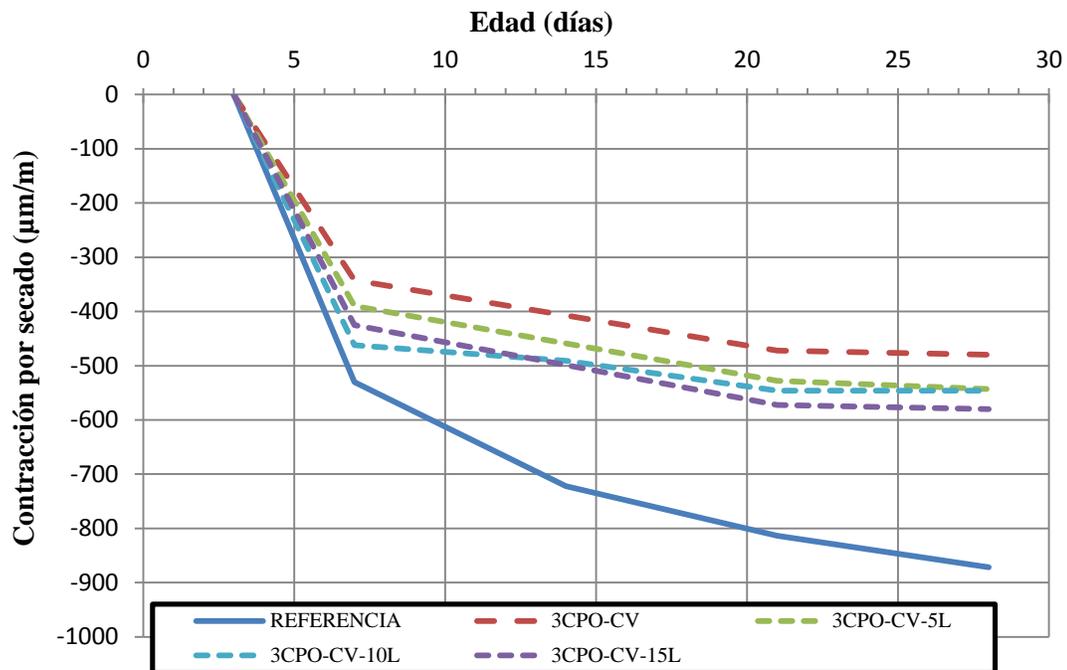


Figura 6.22 - Contracción por secado de la Serie C

6.2.3. Propiedades en estado endurecido

6.2.3.1. Resistencia a la compresión

Los resultados de las resistencias a la compresión, de todas las mezclas estudiadas a las edades de 7, 28 y 56 días, se muestran en la Figura 6.23. Se observó que al remplazar el cemento Portland por ceniza volante hubo una reducción en las resistencias.

La reducción en las resistencias a la compresión es causada por la baja reactividad de la ceniza volante utilizada en esta investigación; además, a que su tamaño de partícula es mucho más grande que el del cemento Portland, lo cual pudo haber causado deficiencias en el empaquetamiento de las partículas.

Por otra parte, las sustituciones de micro-polvo de carbonato de calcio ocasionaron un ligero incremento en las resistencias a la compresión a edades tempranas, comparadas con las mezclas de ceniza volante en las que no se añadió este micro-polvo (1CPO-CV, 2CPO-CV y 3CPO-CV). Este ligero incremento se presentó debido a la aceleración de la hidratación causada por el efecto de relleno (“filler”) y por el papel de las partículas de micro-polvo como centros de nucleación, debido a su tamaño de partícula.

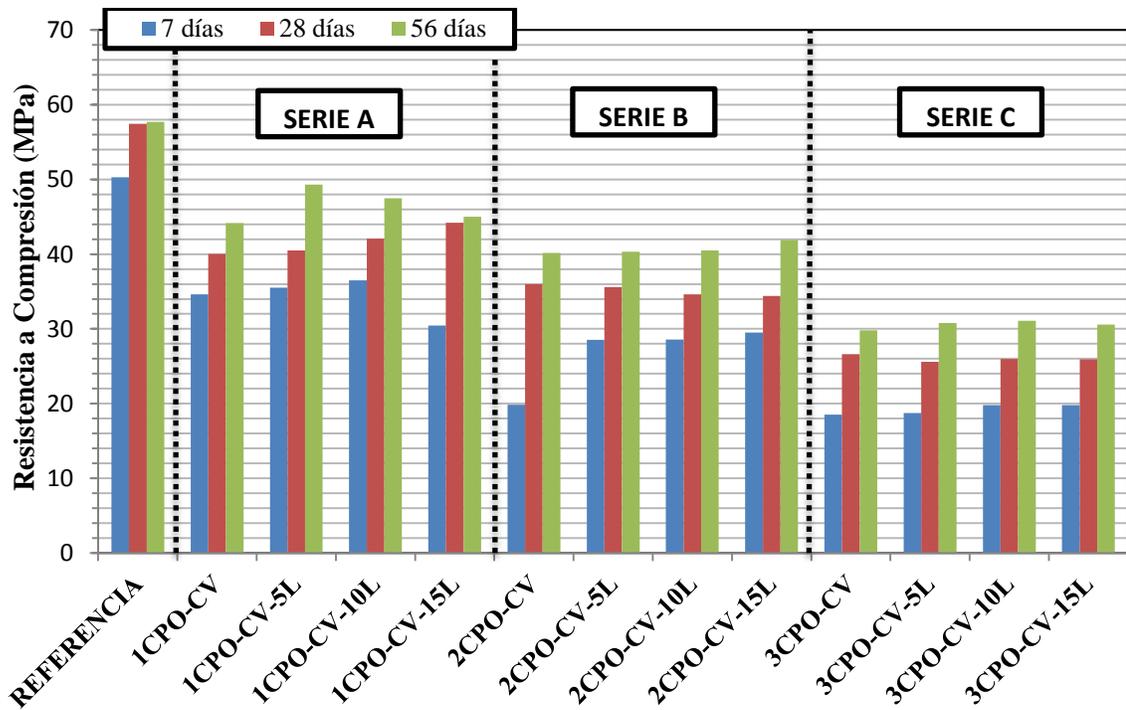


Figura 6.23 - Resistencias a la compresión de las mezclas estudiadas

6.2.3.2. Indicadores de durabilidad

- **Carbonatación**

Los resultados de las mediciones de la profundidad de carbonatación de los especímenes curados durante 28 días, de las series A, B y C se muestran en las Figuras 6.24, 6.25 y 6.26, respectivamente. Mientras que en las Figuras 6.27, 6.28 y 6.29 se muestran los resultados de los especímenes curados durante 56 días, de las series A, B y C, respectivamente. La mezcla de referencia no presentó carbonatación para ninguna de las edades de curado a ninguna edad de exposición al CO₂, lo cual puede deberse a la alta concentración de Hidróxido de Calcio (CH), dando lugar a un efecto de amortiguamiento (“buffering effect”) al retrasar la entrada del CO₂^[12]. También se observó un aumento en la profundidad de carbonatación al aumentar el nivel de sustitución de cemento Portland por ceniza volante, esto es consistente con estudios realizados previamente^{[21][79],[80]}. El aumento en la carbonatación se debe a que la reacción puzolánica de la ceniza volante causa una reducción en el contenido de Hidróxido de Calcio y esto incrementa la velocidad de carbonatación. Por otra parte, al aumentar el curado, se observó una ligera reducción de la profundidad de carbonatación, principalmente en la serie A, esto pudo deberse a que a esta edad se han formado un mayor número de productos de hidratación, reduciendo el tamaño de poro y por lo tanto, reduciendo la permeabilidad^[80].

Por otro lado, no se observó un efecto significativo al reemplazar la ceniza volante por el micro-polvo de carbonato de calcio, el efecto causado por la reacción puzolánica de la ceniza volante y la consecuente disminución de CH en los morteros fue predominante en estas mezclas.

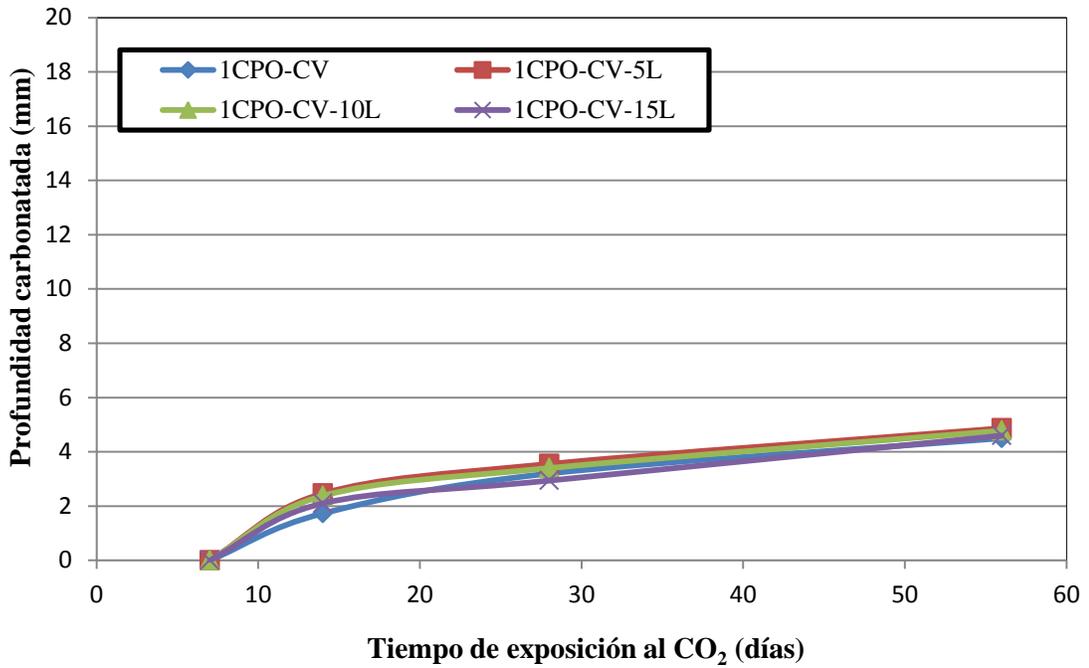


Figura 6.24 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie A curados por 28 días

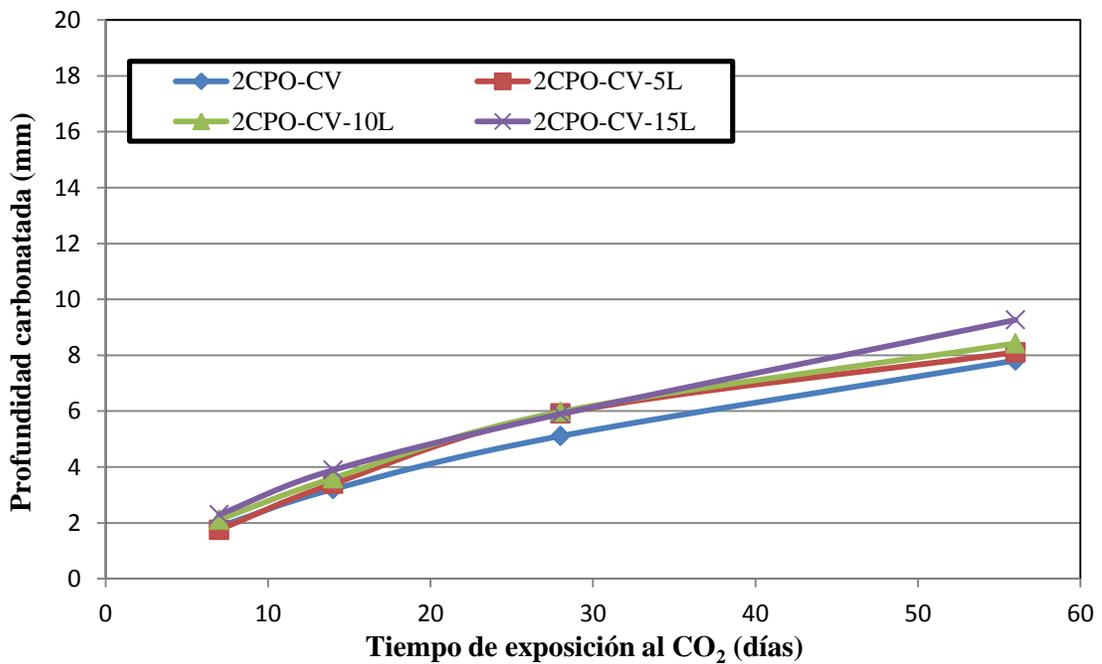


Figura 6.25 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie B curados por 28 días

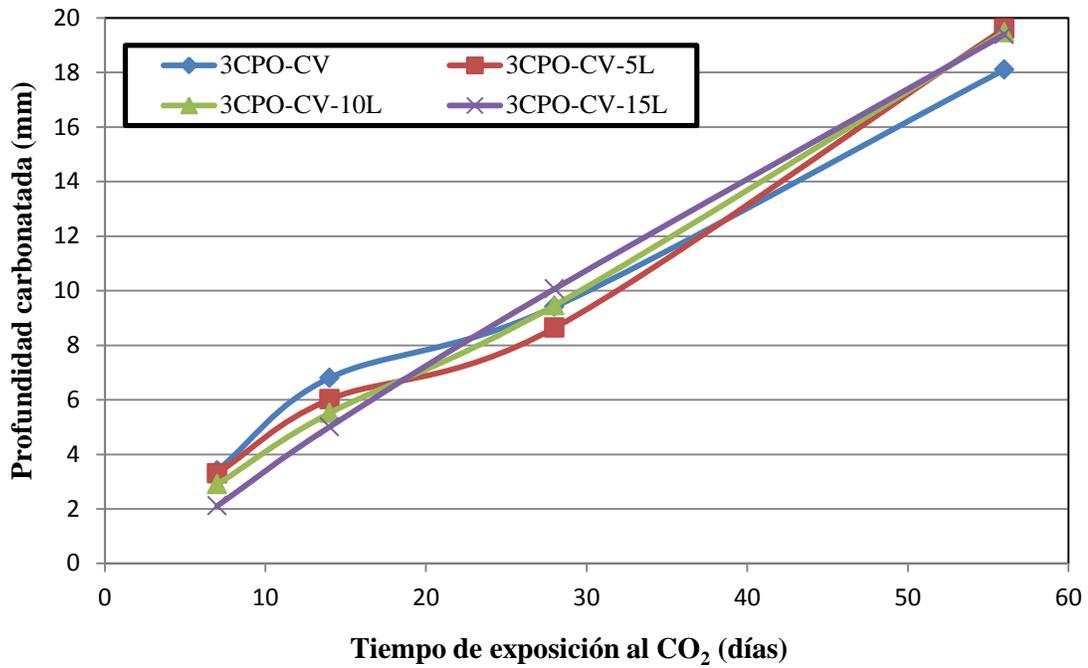


Figura 6.26 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie C curados por 28 días

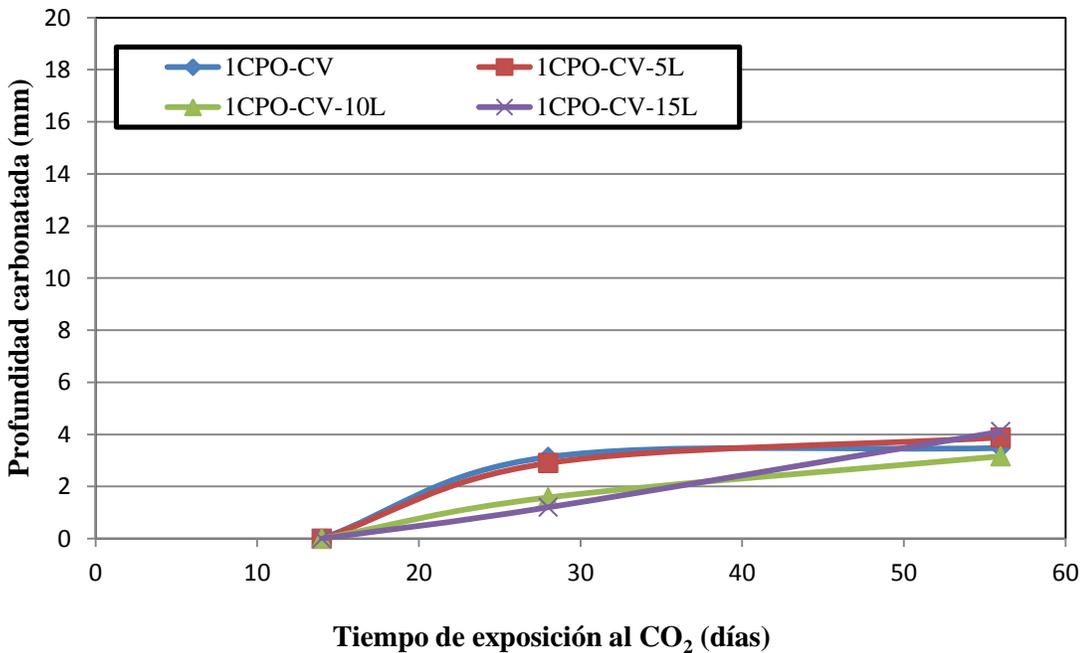


Figura 6.27 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie A curados por 56 días

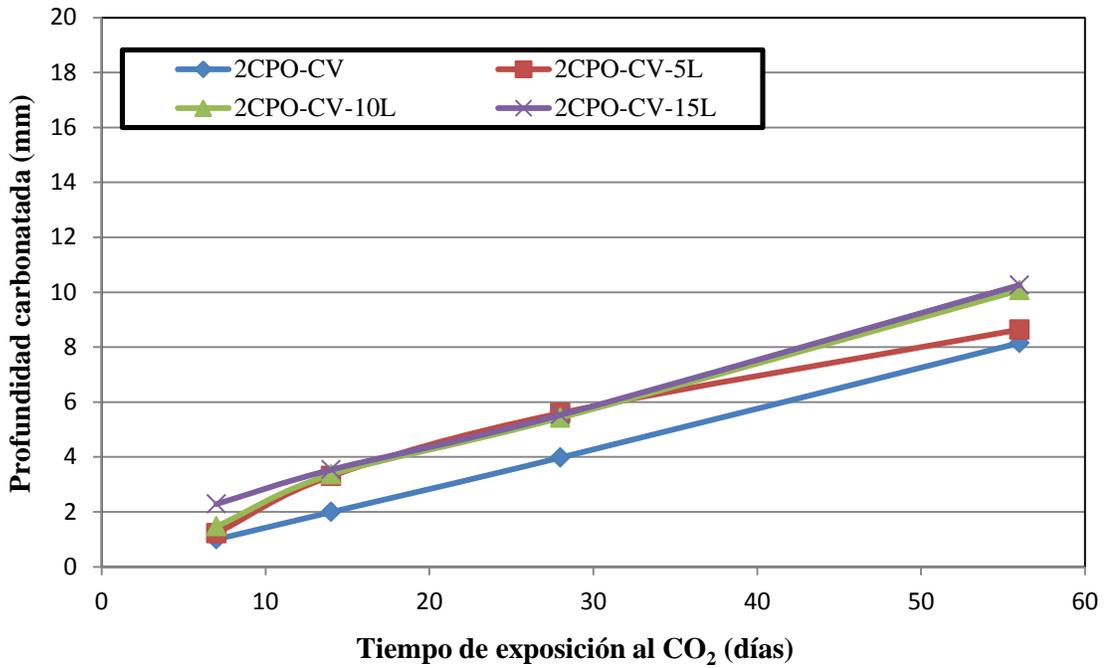


Figura 6.28 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie B curados por 56 días

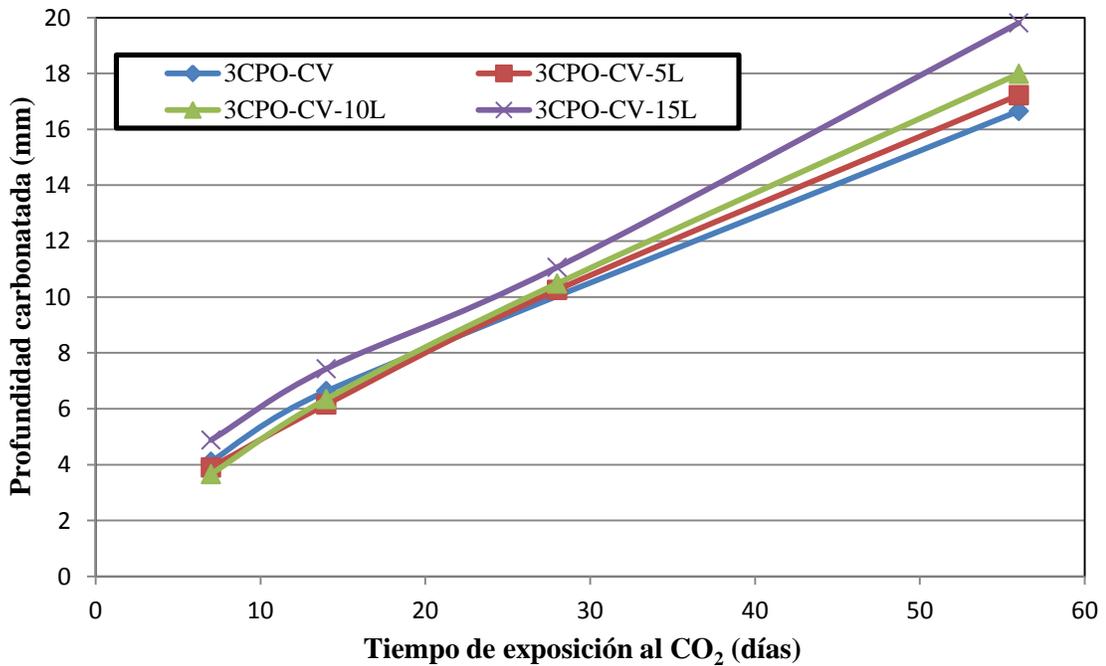


Figura 6.29 - Profundidad de carbonatación de los especímenes de la Serie C curados por 56 días

La Figura 6.30 presenta los coeficientes de difusión de carbonatación para las series A, B y C. Se calculó el coeficiente de difusión de carbonatación, para los dos tipos de curado, como la pendiente de la gráfica de profundidad de carbonatación Vs la raíz cuadrada del tiempo, de acuerdo con la primera ley de Fick (ecuación 5):

$$X = K_{acc} \cdot \sqrt{t} \quad 5$$

Donde X es la profundidad de carbonatación (mm), K_{acc} es el coeficiente de difusión de carbonatación (mm/ $\sqrt{\text{años}}$) y t es el tiempo (años).

En la Figura 6.30, las líneas sólidas representan los especímenes curados durante 28 días, mientras que las líneas punteadas, los especímenes curados durante 56 días. Se pudo observar que, conforme se incrementó la sustitución de ceniza volante o ceniza volante mas micro polvo de carbonato de calcio, el coeficiente de difusión de carbonatación resultó mayor, lo que era de esperarse, ya que debido a una menor cantidad de cemento, el hidróxido de calcio presente en la matriz será menor. En la Figura 6.31 se presenta la correlación entre el coeficiente de difusión de carbonatación y la resistencia a la compresión, en la cual se observa que los morteros con resistencia a la compresión similar presentan coeficientes de difusión de carbonatación similares.

Por otra parte, para las tres series, los coeficientes de difusión de carbonatación indican que la velocidad de carbonatación es muy similar para las dos edades de curado (28 y 56 días de curado).

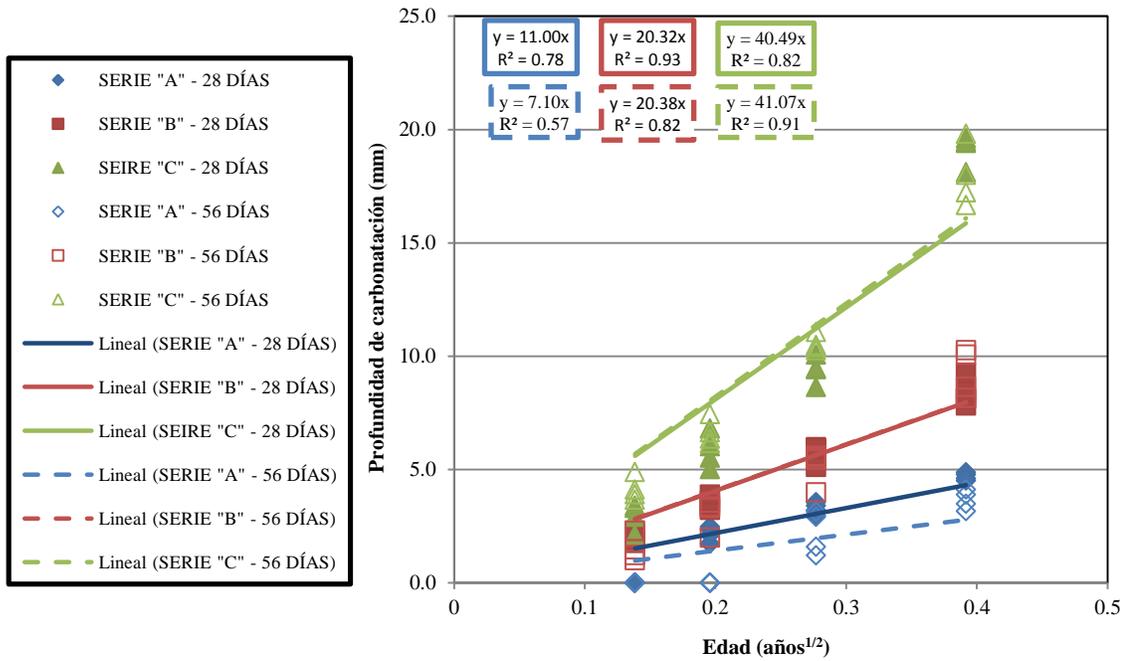


Figura 6. 30 - Profundidad de carbonatación Vs la raíz cuadrada del tiempo (años)

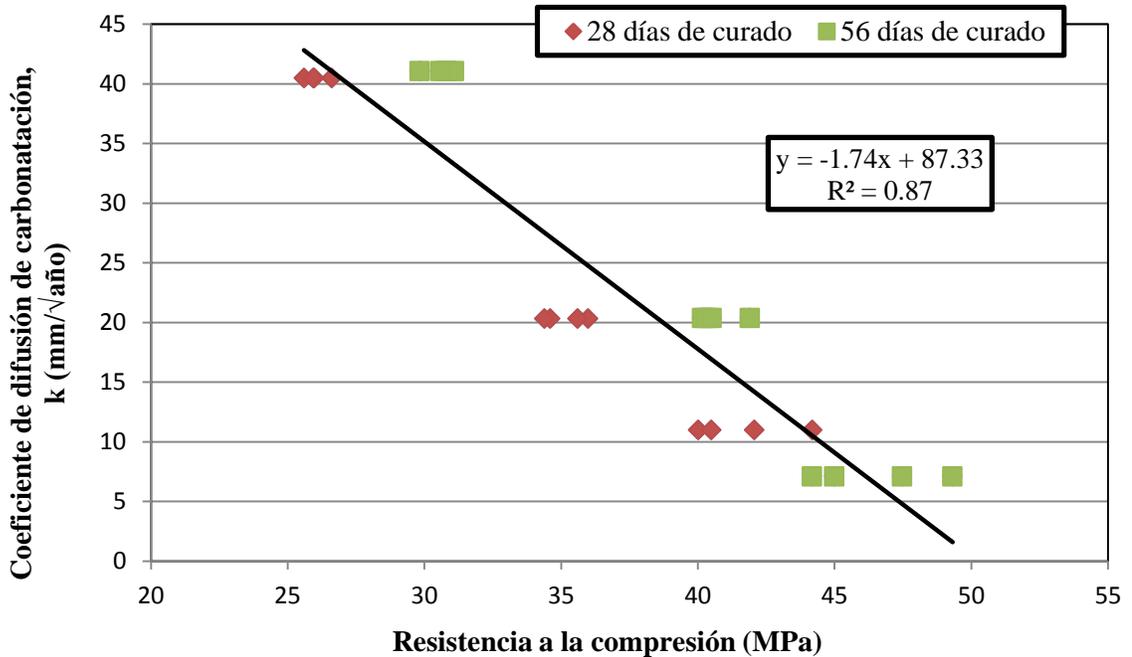


Figura 6.31. Correlación entre el coeficiente de difusión de carbonatación y la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días.

- **Permeabilidad a los iones cloro**

Los resultados de la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro, medidos en términos de la carga eléctrica total pasada a través de los especímenes en Coulombs, obtenidos a las edades de 28 y 56 días de curado, se presentan en la Figura 6.32. En estos resultados se muestran todas las mezclas estudiadas en esta investigación.

Como se puede observar en la Figura 6.32, los resultados muestran que el tiempo de curado tiene un efecto importante en la permeabilidad a los iones cloro, ya que la carga total pasada en los especímenes curados durante 56 días fue mucho menor que la de los especímenes curados durante 28 días. Esto se atribuye al refinamiento de los poros debido a la mayor cantidad de productos de hidratación en los especímenes curados durante 56 días ^[27]. En la Tabla 6.13 se muestran los valores de la reducción de la permeabilidad a los iones cloro, en términos de las diferencias de las cargas totales pasadas en los especímenes curados durante 28 y 56 días.

Con respecto a la referencia, también se pudo observar que, para ambas edades de curado, el aumento en las sustituciones de ceniza volante condujo a una disminución de la carga total pasada. Se sabe que los materiales cementantes suplementarios, como la ceniza volante, tienen un impacto significativo en la habilidad del concreto (o mortero) a resistir la penetración de iones cloro, debido a la capacidad de estos materiales de enlazarse con los cloruros. Usualmente, los iones cloro pueden reaccionar con los aluminatos tricálcicos (C_3A) y C_4AF para formar $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Cloro aluminato de Calcio: sal de Friedel) y $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Cloruro férrico

de Calcio) lo que lleva a la disminución de cloruros libres disponibles. Por lo tanto, el alto contenido de alúmina de la ceniza volante condujo a una mayor cantidad de C_3A en la mezcla, lo cual disminuyó la permeabilidad a los iones cloro ^{[28],[29]}.

Por otro lado, en todas las series, la sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio ocasionó un aumento en la carga total pasada. Estos resultados fueron similares a los resultados de estudios previos, en los que la adición de polvo de carbonato de calcio en la mezcla aumentó la permeabilidad a los iones cloro ^{[15],[30],[81]}. Comparadas con la mezcla de referencia y las mezclas de cemento Portland y ceniza volante, las mezclas con polvo de carbonato de calcio tienen mayor contenido de iones OH^- presentes en la solución de poro. Estos iones actúan como un electrolito y son responsables del transporte de una cantidad significativa de carga durante la permeabilidad a los iones cloro, debido a que su conductividad iónica es mayor que la de los otros iones presentes en la solución de poro (Na^+ , K^+ y Ca^{2+}) ^{[15],[16]}. Sin embargo, algunas combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio tuvieron una menor permeabilidad a los iones cloro que la mezcla de referencia. Los resultados de los especímenes curados durante 28 días muestran que en las Series B y C, donde se reemplazó el volumen de cemento Portland en un 45 y un 60% respectivamente, se puede combinar a la ceniza volante con hasta un 5% de micro-polvo de carbonato de calcio, sin sobrepasar la permeabilidad de la referencia.

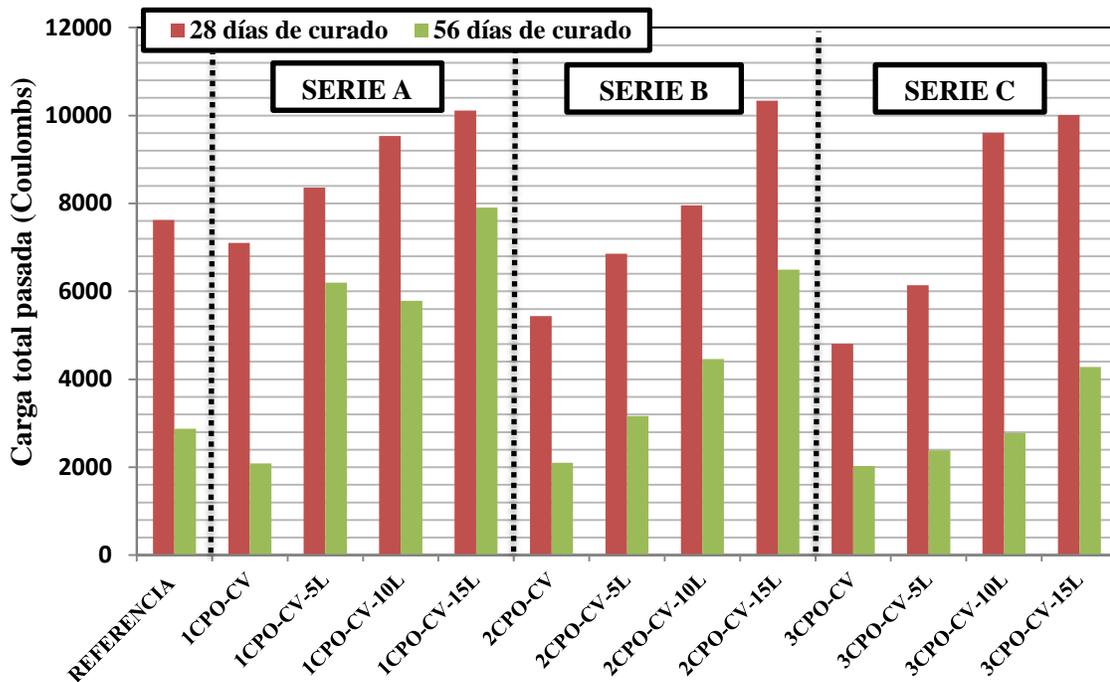


Figura 6.32 - Carga total pasada en la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro

Tabla 6.13 - Reducción de la permeabilidad a los iones cloro, a los 56 días, con relación a los 28 días

Serie	Mezcla	Δ carga total pasada (28 días – 56 días) Coulombs
REF	REFERENCIA	4748
A	1CPO-CV	5020
	1CPO-CV-5L	2159
	1CPO-CV-10L	3754
	1CPO-CV-15L	2209
	2CPO-CV	3339
B	2CPO-CV-5L	3694
	2CPO-CV-10L	3499
	2CPO-CV-15L	3841
C	3CPO-CV	2779
	3CPO-CV-5L	3757
	3CPO-CV-10L	6834
	3CPO-CV-15L	5732

- **Resistividad eléctrica superficial**

El avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de las series A, B y C se muestra en las Figuras 6.33, 6.34 y 6.35 respectivamente. Se pudo observar que la resistividad aumenta al aumentar la sustitución de cemento Portland por ceniza volante. En estudios previos se ha observado la misma tendencia y ésta ha sido atribuida a la densificación de la estructura de poros causada por los productos de hidratación de la ceniza volante ^{[82]-[84]}. Sin embargo, la resistividad eléctrica es una medida indirecta no solo de la porosidad, sino también de la difusividad, ya que el flujo de corriente eléctrica que pasa a través de la pasta hidratada de cemento es un proceso electrolítico; es decir, se debe principalmente al flujo de iones que pasan a través de la solución de poros (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^-) ^[85]. El reemplazo del cemento Portland por ceniza volante causa una disminución en la concentración de estos iones, principalmente de los iones álcalis, lo cual ocasiona una menor conductividad eléctrica y por lo tanto, una mayor resistividad eléctrica ^[86].

Por otro lado, se pudo observar una disminución en la resistividad eléctrica al sustituir parte de la ceniza volante con el micro-polvo de carbonato de calcio. Estos resultados son consistentes con los resultados de permeabilidad a los iones cloro, donde estas mezclas presentaron una carga total pasada mayor que la de las mezclas de cemento Portland y ceniza volante. Se sabe que hay una correlación entre la resistividad eléctrica y la permeabilidad a los iones cloro, en la Figura 6.36 se muestra esta correlación con los datos obtenidos en ambas pruebas, con especímenes curados durante 28 y 56 días, donde se puede observar que la cantidad total de carga pasada es inversamente proporcional a la

resistividad eléctrica. Por lo tanto, también se le atribuyó la disminución de la resistividad en las mezclas con micro-polvo de carbonato de calcio al aumento en la cantidad de iones OH⁻, los cuales son los iones más conductivos presentes en la solución de poro^{[15],[16]}.

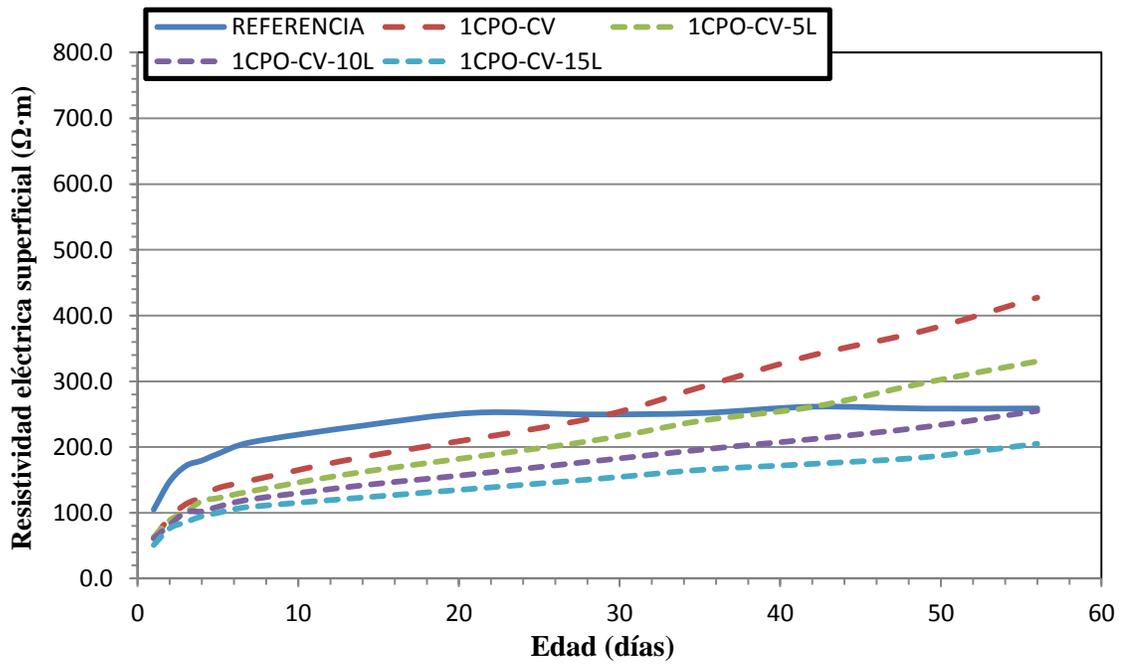


Figura 6.33 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie A

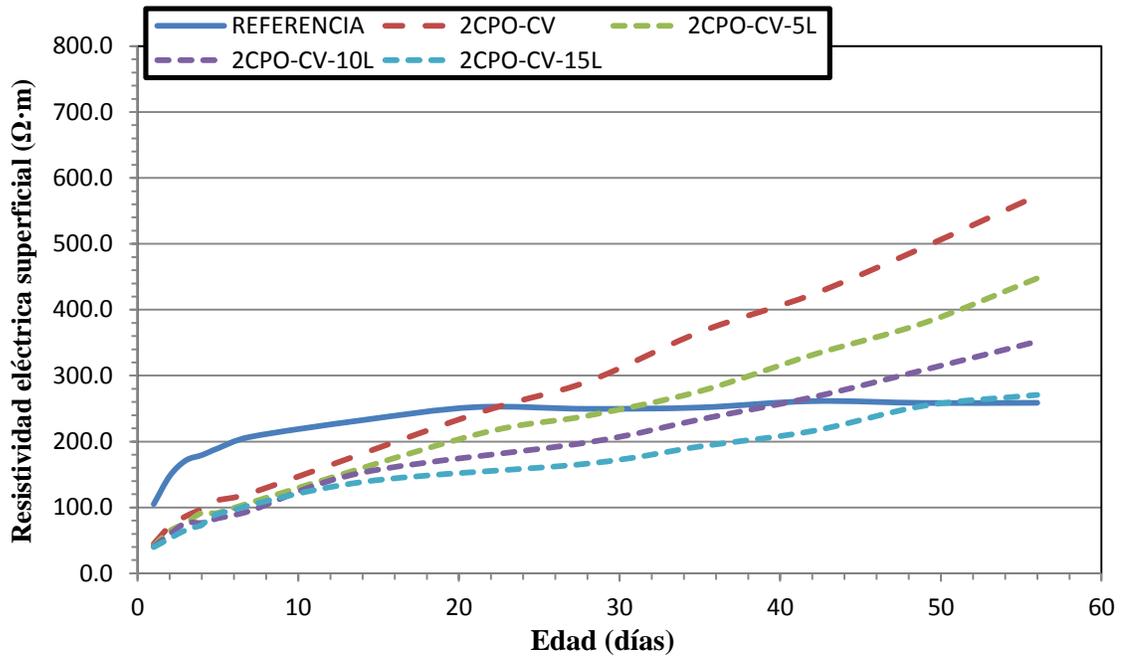


Figura 6.34 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie B

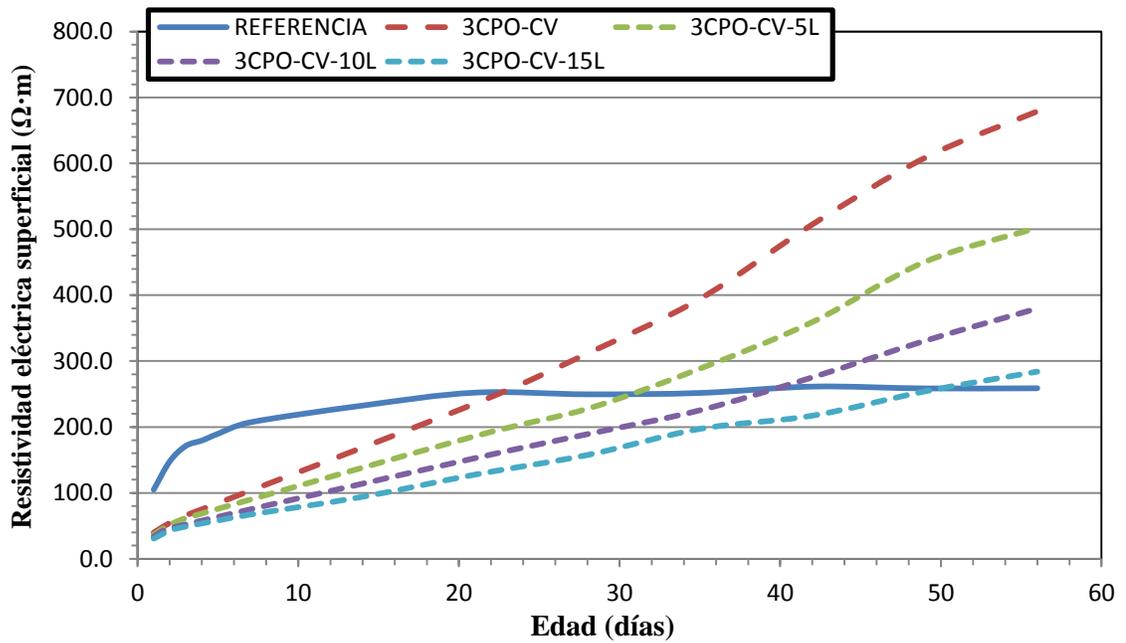


Figura 6.35 - Avance de la resistividad eléctrica superficial con el tiempo de curado de la serie C

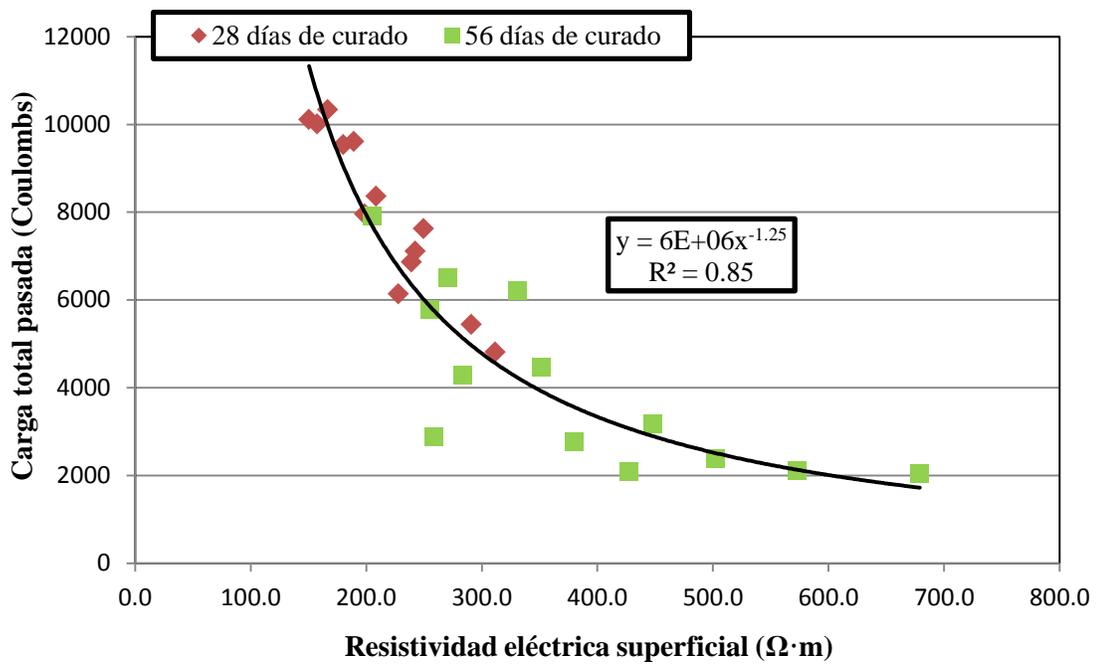


Figura 6.36 - Correlación entre la carga total pasada y la resistividad eléctrica superficial de las mezclas estudiadas

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones sobre el efecto de las diferentes sustituciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio en las diferentes propiedades descritas en la metodología experimental.

7.1. Propiedades en estado fresco

7.1.1. Fluidéz

1. La dosificación de aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante (HRWRA) disminuyó al sustituir el cemento Portland por ceniza volante. Sin embargo, se observó que para altos volúmenes de ceniza volante, la dosificación puede aumentar debido al incremento en la cohesividad de la mezcla.
2. La sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de Calcio no tuvo efecto en la demanda de HRWRA.

7.1.2. Masa unitaria

3. La sustitución del cemento Portland por ceniza volante condujo a una disminución de la masa unitaria, mientras que la sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio condujo a un aumento en la masa unitaria. Esto se debe a la diferencia de densidades entre estos materiales.

7.1.3. Contenido de aire

4. La sustitución de cemento Portland por ceniza volante condujo a un aumento considerable en el contenido de aire de los morteros en estado fresco.
5. La sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio ocasionó una disminución en el contenido de aire de las mezclas, debido al efecto de relleno que aporta el micro-polvo de carbonato de calcio al mejorar el empaquetamiento de los polvos.

7.1.4. Tiempos de Fraguado

6. La sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio condujo a la reducción de los retardos en los tiempos de fraguado ocasionados por la lenta hidratación de la ceniza volante.
7. Las sustituciones de 5% de micro-polvo de carbonato de calcio en mezclas con sustituciones de ceniza volante, hasta de un 45% con relación al volumen de cemento Portland, ayudaron a mantener los tiempos de fraguado en valores similares a los de las mezclas fabricadas solamente con cemento Portland.

7.2. Estabilidad volumétrica

7.2.1. Deformación autógena

8. La contracción autógena disminuye considerablemente, entre más cemento Portland se sustituye por ceniza volante o por alguna combinación de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio.

9. En todas las series, las mezclas con un 5% de micro-polvo de carbonato de calcio presentaron la menor contracción autógena. Con relación a la mezcla de referencia, se redujo la contracción en 61, 78 y 86%, para las series A, B y C, respectivamente.
10. Altos volúmenes de ceniza volante en la mezcla condujeron a una expansión autógena en las primeras cinco horas después del fraguado final, causada por la posible formación de etringita y/o la adsorción de agua de sangrado.

7.2.2. Contracción por secado

11. La contracción por secado a los 28 días disminuyó considerablemente al sustituir el Cemento Portland por las combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio. Las sustituciones de 30, 45 y 60% de estas combinaciones condujeron a una disminución de la contracción por secado, con respecto a las mezclas de solamente cemento Portland, de aproximadamente 18, 31 y 39%, respectivamente.

7.3. Propiedades en estado endurecido

7.3.1. Resistencia a la compresión

12. La resistencia a la compresión disminuye al remplazar el cemento Portland por ceniza volante, debido a la baja reactividad de este material.
13. La incorporación del micro-polvo de carbonato de calcio condujo a un ligero incremento en la resistencia a la compresión a edades tempranas, mismo que se atribuye a la aceleración de la hidratación causada por el papel de las partículas de este material como centros de nucleación.

7.3.2. Indicadores de durabilidad

7.3.2.1. Carbonatación

14. La disminución del contenido de Hidróxido de Calcio al sustituir cemento Portland por ceniza volante o por las combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio ocasionó un aumento en la profundidad de carbonatación. A mayor sustitución, mayor resultó ser el efecto.
15. Un mayor tiempo de curado no tuvo repercusiones favorables en el coeficiente de difusión de la carbonatación.

7.3.2.2. Permeabilidad a los iones cloro

16. El aumento en las sustituciones de ceniza volante condujo a una disminución de la carga total pasada en la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro, debido al posible enlace de los cloruros con las fases de alúmina de la ceniza volante.
17. La sustitución de la ceniza volante por el micro-polvo de carbonato de calcio ocasionó un aumento de la carga total pasada, en la prueba rápida de permeabilidad a los iones cloro, lo cual pudo ser causado por una mayor conductividad de la solución de poro de estas mezclas al encontrarse mayor cantidad de iones OH^- por la presencia del micro-polvo.
18. Para especímenes curados durante 28 días, se puede utilizar hasta un 5% de micro-polvo de carbonato de calcio en conjunto con las diferentes sustituciones de ceniza volante (30, 45 y 60%), sin sobrepasar la permeabilidad a los iones cloro de las mezclas fabricadas solamente con Cemento Portland.

19. El tiempo de curado redujo significativamente la permeabilidad a los iones cloro, sin importar la combinación de polvos utilizada. (aproximadamente un 50% de reducción en promedio, para los especímenes curados durante 56 días, con relación a aquellos curados durante 28 días)

7.3.2.3. Resistividad eléctrica

20. La resistividad eléctrica aumentó al incrementar la sustitución de cemento Portland por ceniza volante, esto se atribuye a una densificación de la estructura de poros causada por los productos de hidratación de la ceniza volante y a la reducción de la conductividad eléctrica por la disminución en la concentración de iones álcalis.

21. La sustitución de ceniza volante por micro-polvo de carbonato de calcio condujo a la disminución de la resistividad eléctrica de la mezcla.

22. Se constató la correlación existente entre la resistividad eléctrica y la permeabilidad a los iones cloro. La cantidad total de carga pasada durante la prueba de permeabilidad a los iones cloro es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica obtenida con el medidor de resistividad de cuatro puntos de tipo Wenner.

CAPÍTULO 8

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación y con lo reportado por la bibliografía consultada, se dan las siguientes recomendaciones, encaminadas a complementar el estudio del efecto que tienen las combinaciones de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio en las propiedades del concreto autocompactable:

- En la presente investigación se trabajó con mortero equivalente a concreto autocompactable; por lo tanto, se recomienda convertir los morteros de esta investigación a concretos autocompactables que permitan evaluar el efecto de las combinaciones de ceniza Volante y micro-polvo de carbonato de calcio en las propiedades de estabilidad dinámica y estática, así como en la reología de las mezclas.
- Corroborar las tendencias obtenidas en las pruebas de durabilidad en mezclas de concreto autocompactable, utilizando las combinaciones óptimas, resultantes de este estudio, de ceniza volante y micro-polvo de carbonato de calcio.
- Obtener y caracterizar la solución de poro de las mezclas fabricadas con las diferentes combinaciones estudiadas en esta investigación con el fin de complementar los resultados de permeabilidad a los iones cloro y la resistividad eléctrica.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Okamura, M. Ouchi. **“Self-compacting concrete – Development, present and future”** First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Pages: 3-14. (1999).
- [2] S. Assié, G. Escadeillas, V. Waller. **“Estimates of self-compacting concrete potential durability”**. Construction and Building Materials. Vol. 21. Pages: 1909-1917. (2007).
- [3] M. Uysal, K. Yilmaz. **“Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 33. Pages: 771-776. (2011).
- [4] ACI Committee 237. **“ACI 237R-07 – Self-Consolidating Concrete”**. American Concrete Institute. (2007).
- [5] D. Feys. **“Interactions between Rheological Properties and Pumping of Self Compacting Concrete”** Doctoral dissertation, Ghent University. (2009).
- [6] B. Felekoglu. **“Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case”**. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 51. Issue 4. Pages: 770-791. (2007).
- [7] M. Uysal, K. Yilmaz. **“Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 33. Pages: 771-776. (2011).

- [8] J. K. Kim, S. H. Han, Y. D. Park, J. H. Noh, C. L. Park, Y. H. Kwon, S. G. Lee. **“Experimental research on the material properties of super flowing concrete”**. Production Methods and Workability of Concrete, E&FN Spon. Pages: 271-284. (1996).
- [9] Q. Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, D. Deng. **“Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review”**. Construction and Building Materials. Vol. 23. Pages: 1-13. (2009).
- [10] B. Felekoğlu, K. Tosun, B. Baradan, A. Altun, B. Uyulgan. **“The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars”**. Cement and Concrete Research. Vol. 36. Issue 9. Pages: 1719-1726. (2006).
- [11] K. De Weerdt, M. Ben Haha, G. Le Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes, B. Lothenbach. **“Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder”**. Cement and Concrete Research. Vol. 41. Pages: 279-291. (2011).
- [12] B. Lagerblad. **“Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art”**. NORDEN Nordic Innovation Centre. (2006).
- [13] L. Tang and W. Zhu. **“Chloride Penetration”** Report 38: Durability of Self Compacting Concrete. RILEM TC 205-DSC: State of the Art Report. Pages 77-88 (2007).
- [14] M. Ussal, K. Yilmaz, M. Ipek. **“The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”**. Construction and Building Materials. Vol. 27. Pages: 263-270. (2012).

- [15] M. Ghrici, S. Kenai, M. Said Mansour. **“Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 29. Pages 542-549. (2007).
- [16] C. Andrade. **“Calculation of chloride diffusion in concrete from ionic migration measurements”**. Cement and Concrete Research. Vol. 23, No. 5. Pages: 1655-1667. (1998).
- [17] R. B. Polder. **“Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation”**. Construction and Building Materials. Vol. 15. Pages: 125-131. (2001).
- [18] R.B. Polder. **“Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment”** Proc. RILEM. International Workshop on Chloride Penetration into Concrete. Pages: 255-233. (1995).
- [19] D. P. Bentz, J. Tanesi, A. Ardani. **“Ternary Blends for Controlling Cost and Carbon Content”**. Concrete International. Vol. 35. No. 8. Pages: 51-59. (2013).
- [20] C. D. Atiş. **“Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash”**. Construction and Building Materials. Vol. 17. Pages: 147-157. (2003).
- [21] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat. **“A study on carbonation depth prediction for fly ash”**. Construction and Building Materials. Vol. 20. Pages 744-753. (2006).
- [22] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili. **“Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 33. Pages: 993-1000. (2011).

- [23] J. D. Matthews. **“Performance of limestone filler cement concrete”**. In Euro-Cements-Impact of ENV 197 on Concrete Construction. E&FN Spon, London. Pages 113-147. (1994).
- [24] A. Barker, J. D. Matthews. **“Concrete durability specification by water/cement or compressive strength for European cement types”**. Proc. 3rd International conference on Durability of Concrete. ACI SP-145, American Concrete Institute, Detroit. Pages: 1135-1160. (1994).
- [25] M. Collepardi, S. Collepardi, J. J. Ogoumah-Olagot and F. Simonelli. **“The influence of slag and fly ash on the carbonation of concrete”**. Procedure 8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI SP-221. American Concrete Institute, Detroit. Pages: 483-493. (2004).
- [26] K. De Weerd, K.O. Kjellsen, E. Sellevold, H. Justnes. **“Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements”**. Cement & Concrete Composites. Vol 33 (No.1). Pages: 30–38. (2011).
- [27] A.A. Ramezani-pour, V.M. Malhotra. **“Effect of Curing on the Compressive Strength Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 17. Pages 125-133. (1995).
- [28] P. Dinakar, K.G. Babu, M. Santhanam. **“Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes”** Cement and Concrete Composites. Vol. 30. Pages 880-886. (2008).

- [29] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, A. Ngamjarurojana, A. Chaipanich. **“Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume”**. Materials and Design. Accepted Manuscript. (2014).
- [30] V. Bonavetti, H. Donza, V. Rahhal, E. Irassar. **“Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement”**. Cement and Concrete Research. Vol 30. Pages: 703-708. (2000).
- [31] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M. E. Kocabağ, V. Bayram, K. Mermerdas. **“Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash”**. Construction and Building Materials. Vol. 37. Pages: 160-170. (2012).
- [32] M. Aguayo, P. Yang, K. Vance, G. Sant, N. Neithalath. **“Electrically driven chloride ion transport in blended binder concretes: Insights from experiments and numerical simulations”**. Cement and Concrete Research. Vol. 66. Pages: 1-10. (2014).
- [33] C. Shi, J. A. Stegemann and R. J. Caldwell. **“Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implication on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) Results”**. ACI Materials Journal. Vol. 95. No. 4. Pages: 389-393. (1998).
- [34] K. A. Snyder, X. Feng, B. D. Keen, T. O. Mason. **“Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH⁻, K⁺ and Na⁺ concentrations”**. Cement and Concrete Research. Vol. 33. Pages: 793-798. (2003).

- [35] M. Saleem, M. Shameem, S. E. Hussain and M. Maslehuddin. **“Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete”**. Construction and Building Materials. Vol. 10. No. 3. Pages: 209-214. (1996).
- [36] L. Gurney, D.P. Bentz, T. Sato and W.J. Weiss. **“Using Limestone to Reduce Set Retardation in High Volume Fly Ash Mixtures: Improving Constructability for Sustainability”**. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2290. Concrete Materials. Pages: 139-146. (2012).
- [37] D.P. Bentz, T. Sato, I. de la Varga, W. Weiss. **“Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures”**. Cement & Concrete Composites No. 34. Pages: 11-17. (2012).
- [38] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi. **“Diseño y Control de Mezclas de Concreto”**. Portland Cement Association (PCA). Primera edición. (2004)
- [39] NMX-C-414. **“Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba”**
- [40] ASTM C-150. **“Standard Specification for Portland Cement”**
- [41] ASTM C-618. **“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”**
- [42] NMX-C-111. **“Industria de la construcción – agregados para concreto hidráulico – especificaciones y métodos de prueba”**
- [43] ASTM C-494. **“Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”**
- [44] ASTM C-188. **“Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement”**

- [45] ASTM C-311. **“Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”**
- [46] ASTM C-109. **“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”**
- [47] ASTM C-128. **“Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate”**
- [48] ASTM C-127. **Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate”**
- [49] ASTM C-136. **“Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”**
- [50] ASTM C-494. **“Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”**
- [51] EFNARC, BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA. **“The European Guidelines for Self Compacting Concrete. Specification, Production and Use”**. (2004)
- [52] ASTM C-1611. **“Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete”**
- [53] ASTM C-1621. **“Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring”**
- [54] ASTM C-1610. **“Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique”**
- [55] Schwartzentruber, A; Catherine, C. **“Method of Concrete Equivalent Mortar – A Novel Tool to Help in Formulation of Concrete with Admixtures”**. Materials and Structures. V.33, No.8. Pages 475-482. (2000).

- [56] ASTM C-185. **“Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar”**.
- [57] ASTM C-403. **“Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”**.
- [58] ASTM C-1698. **“Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar”**.
- [59] ASTM C-596. **“Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement”**.
- [60] ASTM C-109. **“Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”**
- [61] ASTM C-1202. **“Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”**
- [62] Resipod family. **“Operating Instructions: Concrete Durability Testing”**.
- [63] W. Morris, E. Moreno, A. Sagues. **“Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe”**. Cement and Concrete Research. Vol 26. Pages 1779-1787. (1996).
- [64] D.P. Bentz, C.F. Ferraris and K.A. Snyder. **“Best Practices Guide for High-Volume Fly Ash Concretes: Assuring Properties and Performance”**. National Institute of Standards and Technology. NIST Technical Note 1812. (2013).
- [65] L. Yijin, Z. Shiqiong and G. Yingli. **“The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar and concrete”**. Iowa State University. Center for Transportation Research and Education.

- [66] H. Fujiwara, S. Nagataki, N. Otsuki, H. Endo. **“Study on reducing unit poder content on high-fluidity concrete by controlling powder particle size distribution”**. Transl. Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng. 30 (532). Pages 117-127. (1996).
- [67] A. Durán-Herrera, C.A. Juárez, P. Valdez, D.P. Bentz. **“Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes”** Cement & Concrete Composites. Vol. 33. Pages: 39-45. (2011).
- [68] T. Cost., P. Bohme. **“Synergies of Portland-Limestone Cements end Their Potential for Concrete Performance Enhencement”**. International Concrete Sustainability Conference, Seattle. (2012).
- [69] D.P. Bentz and M.A. Peltz. **“Reducing Thermal and Autogenous Shrinkage Contributions to Early-Age Cracking”**. ACI Materials Journal Vol. 105, No. 4. Technical Paper. (2008)
- [70] Institute Japan Concrete. **“Technical committee report on autogenous shrinkage”**. Tazawa, editor. Proc. of int. workshop. London: E&FN Spon. Pages 1-63. (1998).
- [71] P. Lura. **“Autogenous deformation and internal curing of concrete”** PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft. (2003).
- [72] C. Jiang, Y. Yang, Y. Wang, Y. Zhou, C. Ma. **“Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures”**. Construction and Building Materials. Vol. 61. Pages: 260-269. (2014).
- [73] D.P. Bentz, O.M. Jensen, K.K. Hansen, J.F. Olsen, H. Stang, C-J. Haecker. **“Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous**

- Strains and Stresses in Cement-Based Materials**". Journal of the American Ceramic Society. Vol. 84 (No. 1). Pages: 129-135. (2001).
- [74] O. Esping. "**Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete**". Cement and Concrete Research. Vol. 38. Pages 938-944. (2008).
- [75] B. Craeye, G. De-Schutter, B. Desmet, J. Vantomme, G. Heirman, L. Vandewalle, O. Cizer, S. Aggoun, E.H. Kadri. "**Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete**". Cement and Concrete Research. Vol. 40. Pages: 908-913. (2010).
- [76] T. Sato and J.J. Beaudoin. "**The Effect of Nano-Sized CaCO₃ Addition on the Hydration of Cement Paste Containing High Volumes of Fly Ash**" Proceedings of the 12th international Congress on the Chemistry of Cement. Page: 12. (2007).
- [77] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn and A. Chaipanich. "**Compressive strength and drying shrinkage of fly ash-bottom ash-silica fume multi-blended cement mortars**". Materials and Design. Vol. 36. Pages: 655-662. (2012).
- [78] P. Chindapasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon. "**Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar**". Cement and Concrete Research. Vol 34. Pages: 1087-1092. (2004).
- [79] H. Ohga and S. Nagataki. "**Prediction of Carbonation Depth of Concrete With Fly Ash**". Special Publication, International Concrete Abstract Portal ACI. Volume: 114. Pages: 275-294. (1989).

- [80] K.K. Sideris, A.E. Savva, J. Papayianni. **“Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 28. Pages: 47-56. (2006).
- [81] M. Seddik Meddah, M. C. Lmbachiya, R. K. Dhir. **“Potencial use of binary and composite limestone cements in concrete production”**. Construction and Building Materials. Vol. 58. Pages 193-205. (2014).
- [82] R. B. Polder, W.H.A. Peelen. **“Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 27. Pages: 427-435. (2002).
- [83] I. De la Varga, R.P. Spragg, C. Di Bella, J. Castro, D.P. Bentz, J. Weiss. **“Fluid transport in high volume fly ash mixtures with and without internal curing”**. Cement & Concrete Composites. Vol. 45. Pages: 102-110. (2014).
- [84] A. Raif Boga, I. Bekir Topçu. **“Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete”**. Construction and Building Materials. Vol. 31. Pages: 258-264 (2012).
- [85] K.O. Ampadu, K. Torii, M. Kawamura. **“Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste”**. Cement and Concrete Research. Vol. 29. Pages: 585-590. (1999).
- [86] C. Shi. **“Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results”**. Cement and Concrete Research. Vol. 34. Pages: 537-545. (2004).

ANEXO A

CÁLCULO DE MORTERO EQUIVALENTE A CONCRETO

El cálculo necesario para la obtención del Proporcionamiento de la mezcla de Mortero Equivalente a Concreto (MEC) de referencia se presenta a continuación:

- El primer paso para el cálculo de las proporciones de mezcla del MEC es calcular el área superficial de los agregados grueso y fino, utilizando el análisis granulométrico correspondiente a cada uno de ellos y asumiendo que las partículas de los agregados sean esféricas.
- Considerando las proporciones de la mezcla de concreto autocompactable mostradas en la Tabla 5.1 del presente trabajo, el cálculo del área superficial de las partículas de los 1136.3 kg/m^3 de agregado fino y los 696.7 kg/m^3 de agregado grueso se muestra en las Tablas A.1 y A.2, respectivamente.
- Como se muestra en las Tabla A.1 y A.2, el área superficial de los 1136.3 kg/m^3 de agregado fino del concreto autocompactable es de $1.14E+08 \text{ cm}^2$, mientras que el área superficial de los 693.7 kg/m^3 de agregado grueso es de $1.24E+06 \text{ cm}^2$. Por lo tanto, el área superficial total de las partículas de los agregados es de $1.15E+08 \text{ cm}^2$.

- El área del agregado fino del mortero equivalente a concreto debe de ser entonces de $1.15E+08 \text{ cm}^2$. Por lo tanto, la cantidad de agregado fino (en kg) necesaria para tener ese valor de área superficial se calculó de la siguiente manera:
 - 1kg de A.F. tiene un área superficial igual a $(1.14E+08 \text{ cm}^2) / (1136.3 \text{ kg}) = 100102.26 \text{ cm}^2/\text{kg}$.
 - Cantidad necesaria de arena es igual a $(1.15E+08 \text{ cm}^2) / (100102.26 \text{ cm}^2/\text{kg}) = 1148.7 \text{ kg}$
- La cantidad necesaria en masa de agregado fino fue de 1148.7 kg lo cual es equivalente a un volumen de 0.420 m^3 . El contenido del resto de los ingredientes (Cemento Portland, agua, aditivos y aire) no tuvo ningún cambio. Por lo tanto, el volumen total del MEC fue menor a 1 m^3 debido a la falta de agregado grueso.
- Como es más conveniente expresar las proporciones de la mezcla por 1 m^3 , el volumen de cada ingrediente fue corregido multiplicando cada volumen por un factor igual a: $1 \text{ m}^3 / 0.749 \text{ m}^3 = 1.335$
- Las proporciones del Mortero Equivalente a Concreto resultante de este cálculo se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla A. 1- Cálculo del área superficial del agregado fino, para un contenido de 1136.3 kg/m³

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Tamaño malla, (mm)	% que pasa acumulado	% que pasa entre dos mallas	Masa que pasa entre dos mallas (Kg)	Volumen que pasa entre dos mallas (cm ³)	Diámetro Promedio D _i (cm)	Volumen de una Partícula (cm ³)	Núm. De Partículas	Área superficial de una partícula (cm ²)	Área Superficial (cm ²)
			Columna C x Cantidad de arena	Columna D / Densidad x 1000	promedio entre dos mallas	$\pi D_i^3/6$	Columna E/ Columna G	πD_i^2	Columna H x Columna I
	0	0	0.0	0.0					
0.074	11	11	125.0	45736.3	0.004	2.65E-08	1.72E+12	4.30E-05	7.42E+07
0.149	15	4	45.5	16631.4	0.011	7.26E-07	2.29E+10	3.91E-04	8.95E+06
0.30	25	10	113.6	41578.5	0.022	5.81E-06	7.16E+09	1.56E-03	1.12E+07
0.594	40	15	170.5	62367.7	0.045	4.63E-05	1.35E+09	6.24E-03	8.40E+06
1.18	63	23	261.4	95630.5	0.089	3.65E-04	2.62E+08	2.47E-02	6.47E+06
2.36	91	28	318.2	116419.8	0.177	2.90E-03	4.01E+07	9.84E-02	3.95E+06
4.75	100	9	102.3	37420.6	0.356	2.35E-02	1.59E+06	3.97E-01	6.32E+05
9.5	100	0	0.0	0.0	0.713	1.89E-01	0.00E+00	1.59E+00	0.00E+00
	$\Sigma = 100$		$\Sigma = 1136.3$	$\Sigma = 415784.9$					$\Sigma = 1.14E+08$

Tabla A.2 - Cálculo del área superficial del agregado grueso, para un contenido de 693.7 kg/m³

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Tamaño malla, (mm)	% que pasa acumulado	% que pasa entre dos mallas	Masa que pasa entre dos mallas (Kg)	Volumen que pasa entre dos mallas (cm ³)	Diámetro Promedio D _i (cm)	Volumen de una Partícula (cm ³)	Núm. De Partículas	Área superficial de una partícula (cm ²)	Área Superficial (cm ²)
			Columna C x Cantidad de arena	Columna D / Densidad x 1000	promedio entre dos mallas	$\pi D_i^3/6$	Columna E/ Columna G	πD_i^2	Columna H x Columna I
	0	0	0.0	0.0					
2.36	0	0	0.0	0.0	0.118	8.60E-04	0.00E+00	4.37E-02	0.00E+00
4.75	1	1	7.0	2548.4	0.356	2.35E-02	1.08E+05	3.97E-01	4.30E+04
9.53	13	12	83.6	30580.2	0.714	1.90E-01	1.61E+05	1.60E+00	2.57E+05
12.7	40	27	188.1	68805.6	1.111	7.19E-01	9.58E+04	3.88E+00	3.72E+05
19.05	96	56	390.2	142707.8	1.588	2.09E+00	6.81E+04	7.92E+00	5.39E+05
25.4	100	4	27.9	10193.4	2.223	5.75E+00	1.77E+03	1.55E+01	2.75E+04
	$\Sigma = 100$		$\Sigma = 693.7$	$\Sigma = 254835.4$					$\Sigma = 1.24E+06$

ANEXO B

PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

El proceso de mezclado de los morteros estudiados fue establecido con base en el proceso de mezclado del concreto autocompactable de referencia. Los tiempos de mezclado se establecieron con base en el tiempo de reacción de los aditivos químicos utilizados (PLASTOL PRECAST y VISCTROL).

A continuación se describen los procedimientos de mezclado para el concreto autocompactable de referencia y para los morteros estudiados.

B.1. Proceso de mezclado del concreto autocompactable

La mezcla de concreto autocompactable se preparó utilizando un volumen de 40 Litros en una mezcladora de tambor.

1. Se homogenizaron los agregados (fino y grueso) en la mezcladora, agregando también el agua necesaria para tenerlos en la condición de saturado superficialmente seco. Esto se realizó durante 1 minuto con 30 segundos.
2. Se vació el cemento Portland junto con el aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante (PLASTOL PRECAST) y el resto del agua, separando una porción del agua para homogeneizar el aditivo modificador de la viscosidad (VISCTROL).

3. Se mezclaron los materiales durante 3 minutos dentro de la mezcladora de tambor.
4. Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar la mezcla durante 3 minutos, en los cuales se raspó cualquier rastro de cemento que pudiese haber quedado en las paredes de la mezcladora, dentro de los primeros 2 minutos. Al final de los primeros dos minutos se agregó el aditivo modificador de la viscosidad (VISCTROL) con el agua que se separó para su homogeneización. Al final de los 3 minutos de reposo se reinició el mezclado.
5. Se mezclaron los materiales durante otros 3 minutos dentro de la mezcladora de tambor.
6. El tiempo total de mezclado del concreto fue de 9 minutos, sin contar el tiempo de la homogeneización de los agregados.

B.2. Proceso de mezclado de los morteros

Todas las mezclas de mortero se prepararon utilizando un volumen de 6 Litros en una batidora planetaria.

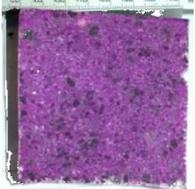
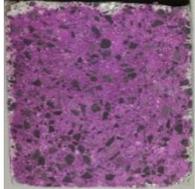
1. Se homogenizó el agregado fino en la batidora planetaria, agregando también el agua necesaria para ponerlo en la condición de saturado superficialmente seco. Este proceso de homogeneización se realizó en 1 minuto y 30 segundos.
2. Se vaciaron los polvos (previamente homogeneizados en una homogeneizadora de pantalón) junto con el aditivo reductor de agua de alto grado hiperfluidificante (PLASTOL PRECAST) y el resto del agua, separando una porción del agua para homogeneizar el aditivo modificador de la viscosidad (VISCTROL).

3. Se mezclaron los materiales durante 3 minutos dentro de la batidora planetaria.
4. Se detuvo la batidora y se dejó reposar la mezcla durante 3 minutos, en los cuales se raspó cualquier rastro de cemento que pudiese haber quedado en las paredes de la batidora dentro de los primeros 2 minutos. Al final de los primeros dos minutos se agregó el aditivo modificador de la viscosidad (VISCTROL) con el agua que se separó para su homogeneización. Al final de los 3 minutos de reposo se reinició el mezclado.
5. Se mezclaron los materiales durante otros 3 minutos dentro de la batidora.
6. Al final de los 3 minutos se apagó la batidora y se homogeneizó el mortero a mano, con la ayuda de un cucharón, durante 1 minuto, para asegurar que no quedó material pegado en el fondo del tazón.
7. El tiempo total de mezclado del mortero fue de 10 minutos, sin contar el tiempo de la homogeneización del agregado fino.

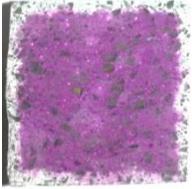
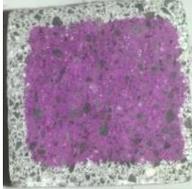
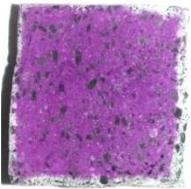
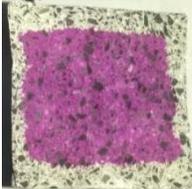
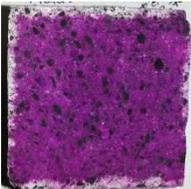
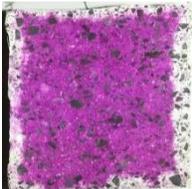
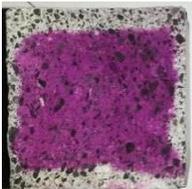
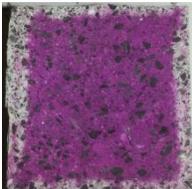
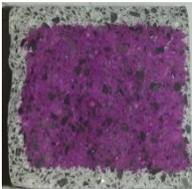
ANEXO C

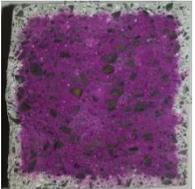
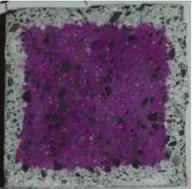
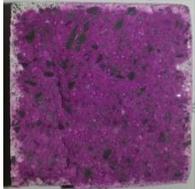
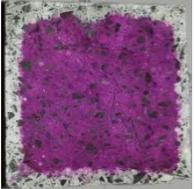
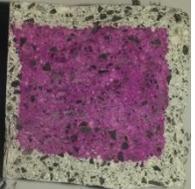
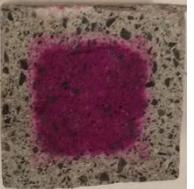
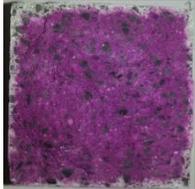
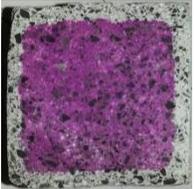
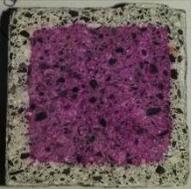
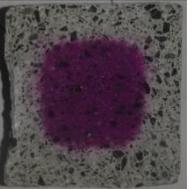
IMÁGENES DE CARBONATACIÓN

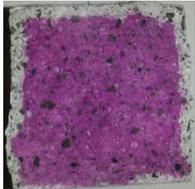
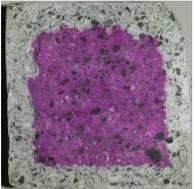
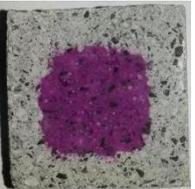
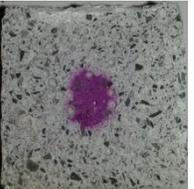
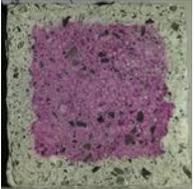
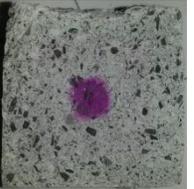
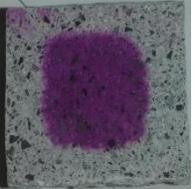
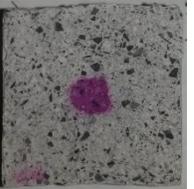
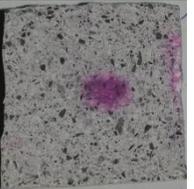
En el presente anexo se muestran las imágenes del avance de la carbonatación con respecto al tiempo de exposición al CO_2 para todas las mezclas estudiadas a diferentes tiempos de curado, 28 y 56 días.

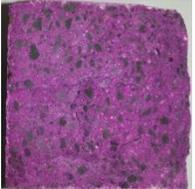
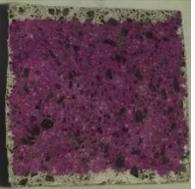
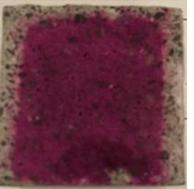
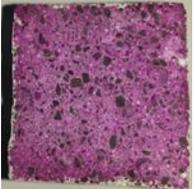
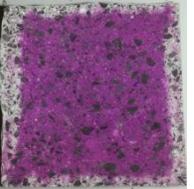
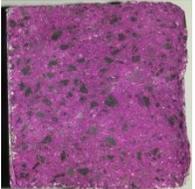
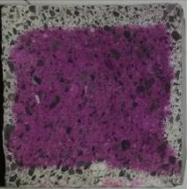
REFERENCIA 28 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO_2			
	7 días	14 días	28 días	56 días
REFERENCIA				

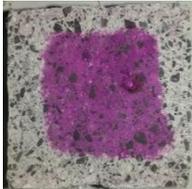
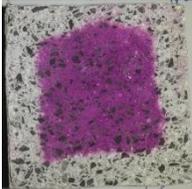
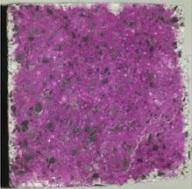
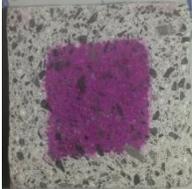
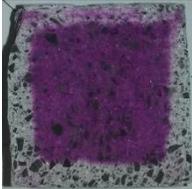
REFERENCIA 56 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO_2			
	7 días	14 días	28 días	56 días
REFERENCIA				

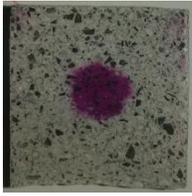
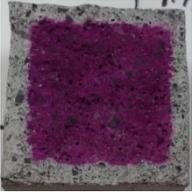
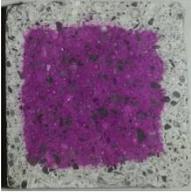
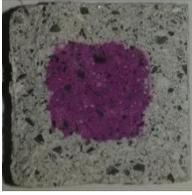
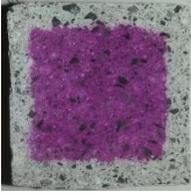
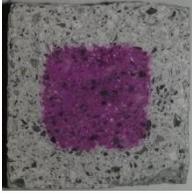
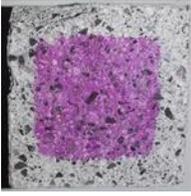
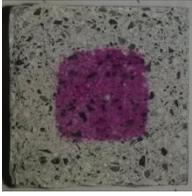
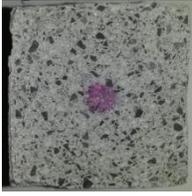
SERIE A 28 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
1CPO-CV				
1CPO-CV-5L				
1CPO-CV-10L				
1CPO-CV-15L				

SERIE B 28 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
2CPO-CV				
2CPO-CV-5L				
2CPO-CV-10L				
2CPO-CV-15L				

SERIE C 28 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
3CPO-CV				
3CPO-CV-5L				
3CPO-CV-10L				
3CPO-CV-15L				

SERIE A 56 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
1CPO-CV				
1CPO-CV-5L				
1CPO-CV-10L				
1CPO-CV-15L				

SERIE B 56 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
2CPO-CV				
2CPO-CV-5L				
2CPO-CV-10L				
2CPO-CV-15L				

SERIE C 56 días de Curado				
Mezcla	Tiempo de Exposición al CO ₂			
	7 días	14 días	28 días	56 días
3CPO-CV				
3CPO-CV-5L				
3CPO-CV-10L				
3CPO-CV-15L				

Juan Antonio de León Esquivel



Estudiante de Maestría en Ciencias con Orientación a los Materiales de Construcción (la cual forma parte del PNPC del CONACYT) de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL en Junio del 2012. Auxiliar Académico y de Investigación en el departamento de Tecnología

del Concreto en el periodo de Enero 2011 a Julio del 2012. Certificación en ACI Concrete Field Testing Technician Grade I, ACI Aggregate Testing Technician Level 1, ACI Concrete Strength Testing Technician y ACI Concrete Laboratory Testing Technician Level 1. Reconocimiento por parte del ACI por el 3er Lugar en desempeño y 3er Lugar en Predicción en la competencia de “FRC Bowling Ball” llevada a cabo en la convención de primavera del 2012 del ACI en Dallas, Texas; USA. Reconocimiento por parte del ACI por el 1er Lugar en la competencia de “The Art of Concrete” en la convención de otoño del 2012 del ACI llevada a cabo en Toronto, Canadá. Participación en el Concurso Nacional de Diseño de Mezclas de Concreto del IMCYC en su primera, segunda, tercera y cuarta edición; en el 2011, 2012, 2013 y 2014 respectivamente. Estancia internacional como investigador invitado en la Missouri Science & Technology University (Missouri S&T) en Rolla, Missouri, bajo la supervisión del Doctor investigador Kamal Khayat en el periodo de julio-agosto del 2013. Participación en el taller “Fundamental of Rheology and Applications on Cement-Based Materials” llevado a cabo en la Universidad de Missouri S&T en Rolla, Missouri, del 14 al 17 de Julio del 2014.

Contacto:

Correo electrónico: jn_dleon@hotmail.com

Celular: 8117883873

Monterrey, Nuevo León.

México.