



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“DURABILIDAD DEL CONCRETO CON AGREGADO
GRUESO RECICLADO DE ALTA ABSORCIÓN”**

TESIS

PRESENTADA POR:

M. I. LUIS FELIPE JIMÉNEZ TORREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

OPCIÓN CONSTRUCCIÓN

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2015

Autorización de impresión

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el H. Sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

RESUMEN

El concreto es un material por completo reciclable, siempre que no esté contaminado. Puede utilizarse en muchas estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para concretos con agregados tradicionales. No obstante, la fabricación de elementos de concreto con agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición puede tener el inconveniente de afectar negativamente sus propiedades físicas y mecánicas, aportando altos valores de porosidad y permeabilidad, lo que facilita la penetración de cargas ambientales como iones cloruros y bióxido de carbono, lo que induce ciertas reacciones químicas que pueden derivar en la corrosión del acero de refuerzo, disminuyendo así su durabilidad.

Existe una gran variedad de pruebas disponibles para el estudio de la durabilidad del concreto, las cuales requieren de equipos y métodos de estudio especializados, así como largos periodos de exposición para observar efectos deletéreos. En el caso de concretos con agregados reciclados, numerosas investigaciones han sido enfocadas en el estudio de propiedades mecánicas, omitiendo con frecuencia los aspectos de durabilidad.

La variación en los resultados de pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad en concretos con agregados reciclados, en muchos estudios anteriores, ha llevado a ensayar distintas tasas de reemplazo de los agregados, con el fin de encontrar un comportamiento consistente en comparación a un concreto normal. Sin embargo, no existe un consenso en cuanto al porcentaje de agregado que puede substituirse. En el caso del agregado fino reciclado, la literatura demuestra que su uso no es recomendable pues afecta el diseño de mezclas y reduce la resistencia a la compresión de los concretos.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación fue enfocada en determinar hasta qué punto es posible substituir el agregado grueso normal por agregado grueso reciclado proveniente de residuos heterogéneos de construcción y demolición, cumpliendo con requisitos de concreto estructural y de durabilidad.

Con los resultados de la investigación se demostró que los concretos estudiados con valores de relación agua/cemento 0.5 y 0.7, típicos de las construcciones en la región, cumplen con los requisitos mecánicos para uso estructural; sin embargo, desde el punto de vista de durabilidad, solamente sería posible utilizar concretos con relación agua/cemento de 0.5, reciclando hasta un máximo de 50% del agregado grueso.

Un segundo aspecto del trabajo, relacionado con la sustentabilidad, acorde a las exigencias actuales en el cuidado de nuestro medio ambiente, consistió en evaluar la huella de carbono originada por la fabricación de los distintos concretos con agregados normales y reciclados que fueron utilizados.

Con respecto a la huella de carbono, el empleo de agregados reciclados no mostró mucha relevancia, pues la producción de cemento es el componente que realmente está impactando en las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por tanto, en busca de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sería muy importante considerar las aportaciones de otros materiales cementantes en un marco más amplio de estudio del análisis de ciclo de vida, más allá del proceso de fabricación, contemplando el uso y disposición final de las construcciones.

ABSTRACT

Concrete is a fully recyclable material, provided it is not contaminated. Recycled concrete can be used in many different structures as long as it complies with the specifications for normal concrete. However, the manufacture of concrete elements with recycled aggregate from construction and demolition debris can have the drawback of high porosity and permeability. This facilitates the penetration of environmental loads such as chloride ions and carbon dioxide, causing chemical reactions that lead to corrosion of reinforcing steel, thus affecting its durability.

A variety of tests are available for the study of the durability of concrete, which require specialized equipment and methods of study, as well as long periods of exposure to observe deleterious effects. In the case of recycled aggregate concrete, several research efforts have focused on the study of mechanical properties, often omitting durability aspects.

The diversity of results obtained from compressive strength and modulus of elasticity tests, made with recycled aggregate concrete, led to try different rates of coarse aggregate replacement in order to find a consistent behavior compared to normal concrete. However, there is no consensus as to the amount of coarse aggregate that may be replaced. According to literature, recycled fine aggregate is not recommended because affects the mixtures design and reduces the compressive strength of the concrete.

Accordingly, this research focused on determining the amount of normal coarse aggregate which may be replaced by recycled coarse aggregate from construction and demolition waste, complying structural and durability requirements for normal concrete.

The results showed that recycled aggregate concrete with typical water/cement ratios in the region, e.g. 0.5 and 0.7, complied the mechanical requirements for structural use; however, from the durability viewpoint, it would be possible to use a maximum of 0.5 water/cement ratio and up to 50% of coarse aggregate.

A second aspect related to sustainability, according to current requirements in the care of the environment, was to assess the carbon footprint caused by the manufacture of concrete with normal and recycled aggregates.

On the case of carbon footprint, the use of recycled aggregates did not show great relevance, because cement production is the component that impacts the most regarding CO₂ emissions to the atmosphere. Therefore, seeking to reduce emissions of greenhouse gases, it would be important to consider the contributions of other cementitious materials in a wider framework for the study of Life Cycle Analysis, beyond the manufacturing process, considering the use and disposal of buildings.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	IV
Abstract	VI
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	4
2.1. Hipótesis de trabajo	4
2.2. Preguntas de investigación	5
2.3. Objetivo general	5
2.4. Objetivos específicos	5
2.5. Justificación	6
2.6. Definición de términos	7
3. Estado del arte	8
3.1. Composición de los residuos de construcción y demolición	8
3.2. Producción de los agregados reciclados	8
3.3. Principales normativas para el uso de agregados reciclados	12
3.4. Características físicas de los agregados reciclados	14
3.4.1. Granulometría	14
3.4.2. Forma y textura superficial	15
3.4.3. Densidad y Absorción	15
3.4.4. Resistencia a la abrasión	16
3.5. Proporcionamiento del concreto con agregados reciclados	17
3.6. Propiedades del concreto con agregados reciclados en estado fresco	18
3.6.1. Consistencia	19
3.6.2. Densidad	20
3.6.3. Contenido de aire atrapado	20
3.7. Propiedades del concreto con agregados reciclados en estado endurecido	21

3.7.1.	Resistencia a la compresión	21
3.7.2.	Módulo de elasticidad	24
3.7.3.	Resistencia a la tensión	25
3.8.	Propiedades relacionadas con la durabilidad	26
3.8.1.	Porosidad y absorción	27
3.8.2.	Absorción capilar	29
3.8.3.	Permeabilidad	30
3.8.4.	Carbonatación	32
3.8.5.	Penetración de cloruros	35
3.8.6.	Ataque por sulfatos	36
3.8.7.	Congelamiento-descongelamiento	37
3.8.8.	Reacción álcali-agregado	37
3.9.	Trabajos de investigación desarrollados en México	39
3.10.	Estudios relacionados con el análisis del ciclo de vida	40
3.11.	Conclusiones del Estado del arte	42
4.	Procedimiento experimental	44
4.1.	Identificación y caracterización de vertederos de RCD	46
4.2.	Obtención de materia prima	47
4.3.	Producción de grava reciclada	48
4.4.	Caracterización de los agregados	50
4.5.	Proporcionamiento de mezclas de concreto	50
4.6.	Fabricación de especímenes de prueba	51
4.7.	Pruebas de los concretos en estado fresco y endurecido	52
4.7.1.	Pruebas de revenimiento	52
4.7.2.	Contenido de aire atrapado	52
4.7.3.	Vacíos en los especímenes de prueba	53
4.7.4.	Resistencia a la compresión	54
4.7.5.	Módulo de elasticidad estático	54
4.8.	Pruebas de durabilidad	55
4.8.1.	Absorción capilar	55

4.8.2.	Permeabilidad al aire	56
4.8.3.	Carbonatación acelerada	56
4.8.3.1.	Cálculo de flujo de CO ₂	58
4.8.4.	Penetración de cloruros	61
4.8.4.1.	Fabricación y acondicionamiento de especímenes de prueba	62
4.8.4.2.	Preparación de agua sintética de mar	62
4.8.4.3.	Tratamiento de especímenes con agua sintética de mar	63
4.8.4.4.	Obtención de polvos de los especímenes de prueba	64
4.8.4.5.	Determinación de la concentración de cloruros totales	65
4.9.	Evaluación de la huella de carbono	67
4.9.1.	Definición y alcances del sistema	69
4.9.2.	Inventario del sistema	71
5.	Resultados y Discusión	73
5.1.	Caracterización de vertedero de RCD	73
5.2.	Pruebas físicas de los agregados	75
5.3.	Diseño de mezclas de concreto	77
5.4.	Propiedades de los concretos en estado fresco	78
5.5.	Propiedades de los concretos en estado endurecido	78
5.6.	Análisis estadístico	83
5.7.	Propiedades de transporte	86
5.7.1.	Resultados de porosidad y absorción capilar	86
5.7.2.	Resultados de permeabilidad al aire	89
5.8.	Resultados de carbonatación natural y acelerada	91
5.9.	Resultados de penetración de cloruros	98
5.10.	Resultados de la evaluación de huella del carbono	106
6.	Conclusiones	109
7.	Referencias	113
8.	Apéndices	130

Apéndice 1. Propiedades índices de los agregados	131
Apéndice 2. Dosificación de mezclas de concreto	135
Apéndice 3. Porosidad, densidad y absorción de los concretos	137
Apéndice 4. Resistencia a la compresión	140
Apéndice 5. Módulo de elasticidad	142
Apéndice 6. Permeabilidad al aire	144
Apéndice 7. Absorción capilar	148
Apéndice 8. Frentes de carbonatación	150
Apéndice 9. Difusión de cloruros	153
Apéndice 10. Concentración de cloruros totales	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1a. Extracción de materiales	1
Figura 1b. Devastación de terreno	1
Figura 2. Generación de RCD en el mundo	2
Figura 3. Uso de agregados reciclados para bases de carreteras	3
Figura 4. Uso de agregados reciclados para concreto	3
Figura 5. Esquema de trituradora de mandíbulas	10
Figura 6. Esquema de trituradora de molino de impactos	10
Figura 7. Esquema de trituradora móvil de conos	11
Figura 8. Consistencia en concretos normales y reciclados	19
Figura 9. Apariencia de concretos con aire atrapado	21
Figura 10. Arreglo para el ensayo de permeabilidad al aire	30
Figura 11. Esquema y detalles del Método Torrent	32
Figura 12. Zonas de reactividad álcali-sílice en México	38
Figura 13. Zonas de reactividad álcali-carbonato en México	39
Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento experimental	45
Figura 15. Imagen satelital de vertederos de RCD	46
Figura 16. Montículos de RCD en vertederos	47
Figura 17. Muestra de materia prima obtenida	48
Figura 18. Muestra preparada para trituración	48
Figura 19. Trituradora portátil de mandíbulas de 4"	48
Figura 20. Trituradora de molino de impactos de la localidad	49
Figura 21a. Grava reciclada	50
Figura 21b. Grava normal	50
Figura 21c. Agregado fino	50
Figura 22. Cilindros de prueba	51
Figura 23. Prueba de revenimiento	52
Figura 24. Medidor de aire atrapado tipo A	52
Figura 25. Prueba de resistencia a la compresión	54
Figura 26. Prueba de módulo de elasticidad	54

Figura 27. Prueba de absorción capilar	55
Figura 28. Prueba de permeabilidad al aire en vigas	56
Figura 29. Cámara de carbonatación acelerada	57
Figura 30. Diagrama de instalación de la cámara de aceleración	58
Figura 31. Avance de los frentes de carbonatación en concretos con 0.5 a/c	61
Figura 32. Avance de los frentes de carbonatación en concretos con 0.7 a/c	61
Figura 33. Inmersión de especímenes en agua sintética de mar	63
Figura 34. Extracción de polvos de concreto	64
Figura 35. Cribado de polvo de concreto	64
Figura 36. Clasificación en bolsas de plástico	64
Figura 37. Pesado de muestra	65
Figura 38. Digestión de muestras	65
Figura 39. Filtración al vacío	66
Figura 40. Muestras aforadas	66
Figura 41. Medición de potenciales electroquímicos	66
Figura 42. Gráfica de Gran para intersecciones electroquímicas	67
Figura 43. Marco de referencia para la evaluación de huella de carbono	68
Figura 44. Sistema de emisiones de CO ₂ en la producción de concreto	70
Figura 45. Composición de RCD en vertederos	74
Figura 46. Granulometría de los agregados gruesos	75
Figura 47. Granulometría del agregado fino	76
Figura 48. f_c en función de %R	80
Figura 49. E_c en función del %R	81
Figura 50. Esfuerzo-Deformación para concretos con 0.5 a/c	81
Figura 51. Esfuerzo-Deformación para concretos con 0.7 a/c	82
Figura 52. E_c vs f_c en concretos con agregados reciclados	83
Figura 53. Porosidad total en función de %R	87
Figura 54. Sorptividad en función de %R	87
Figura 55. Absorción capilar en función del tiempo para 0.5 a/c	89
Figura 56. Absorción capilar en función del tiempo para 0.7a/c	89
Figura 57. Permeabilidad al aire en función de %R	91

Figura 58. Carbonatación en función de %R	95
Figura 59. Avance modelado de los frentes de carbonatación para 0.5 a/c	96
Figura 60. Avance modelado de los frentes de carbonatación para 0.7a/c	96
Figura 61. Carbonatación vs sorptividad	97
Figura 62. Carbonatación vs permeabilidad al aire	97
Figura 63. Carbonatación vs resistencia a la compresión	98
Figura 64. Perfil de cloruros en muestras sumergidas para 0.5 a/c	99
Figura 65. Perfil de cloruros en muestras de salpicadura para 0.5 a/c	99
Figura 66. Perfil de cloruros en muestras sumergidas para 0.7 a/c	100
Figura 67. Perfil de cloruros en muestras de salpicadura para 0.7 a/c	100
Figura 68. Difusión de cloruros en muestras sumergidas	101
Figura 69. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura	102
Figura 70. Difusión de cloruros en muestras sumergidas vs sorptividad	103
Figura 71. Difusión de cloruros en muestras sumergidas vs permeabilidad al aire	103
Figura 72. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura vs sorptividad	104
Figura 73. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura vs permeabilidad al aire	104
Figura 74. Aportaciones de CO ₂ -e por tipo de material	107
Figura 75. Aportaciones de CO ₂ -e por tipo de agregado	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los sistemas de trituración para agregados	11
Tabla 2. Densidad y absorción de agregados gruesos normales y reciclados	16
Tabla 3. Resistencia a la abrasión en agregados gruesos reciclados	16
Tabla 4. Aire atrapado en concretos con agregados reciclados	21
Tabla 5. Resistencia a la compresión en concreto con agregados reciclados	22
Tabla 6. Módulo de elasticidad en concreto con agregados reciclados	25
Tabla 7. Resistencia a la tensión en concreto con agregados reciclados	26
Tabla 8. Porosidad y absorción en concretos con agregados reciclados	29
Tabla 9. Calificación de la calidad de la superficie de concreto	32
Tabla 10. Esquema de objetivos y procedimientos de la investigación	44
Tabla 11. Balance molecular para cálculo de CO ₂	59
Tabla 12. Flujo de CO ₂ y aire en el interior de la cámara	60
Tabla 13. Composición química del agua sintética de mar	63
Tabla 14. Inventario del sistema de emisiones de CO ₂ -e, energía y materiales	72
Tabla 15. Volúmenes de RCD, m ³	73
Tabla 16. Composición de RCD en diferentes partes del mundo	74
Tabla 17. Resultados de las pruebas físicas de los agregados	76
Tabla 18. Composición de las mezclas de concreto, kg/m ³	77
Tabla 19. Propiedades de los concretos en estado fresco	78
Tabla 20. Pruebas físicas y mecánicas de los concretos	79
Tabla 21. Análisis de normalidad de los datos	84
Tabla 22. ANOVA multifactorial para resistencia a la compresión	84
Tabla 23. ANOVA multifactorial para módulo de elasticidad	85
Tabla 24. Prueba de rangos múltiples para %R	85
Tabla 25. Calificación de la durabilidad en función de la sorptividad en concretos con agregados reciclados	88
Tabla 26. Resultados promedio de kT, m ² x 10 ⁻¹⁶	90
Tabla 27. Carbonatación natural en concretos con 0.5 a/c	91

Tabla 28. Carbonatación natural en concretos con 0.7 a/c	92
Tabla 29. Carbonatación acelerada en concretos con 0.5 a/c	92
Tabla 30. Carbonatación acelerada en concretos con 0.7 a/c	92
Tabla 31. Coeficientes de carbonatación convertidos	94
Tabla 32. Nuevos índices sugeridos para calificar la porosidad y sorptividad en concretos con agregado grueso reciclado	105
Tabla 33. Indicadores de durabilidad en concretos con agregado grueso reciclado	105
Tabla 34. Emisiones de CO ₂ -e/m ³ por cada mezcla de concreto	106

1. Introducción

La creciente extracción de material pétreo natural para la producción de concreto en todo el planeta, utilizado para la construcción de diversas obras como presas, puentes, carreteras, viviendas y todo tipo de edificios, trae consigo problemas ambientales por la devastación de áreas naturales y el agotamiento de cauces y canteras (Figuras 1a y 1b).



Figura 1a. Extracción de materiales



Figura 1b. Devastación de terreno

Imágenes adaptadas de Google Earth

Los componentes principales del concreto son: cemento, agua y agregados pétreos, gruesos y finos; estos últimos constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total de este material (Kosmatka et al., 2004). Por otra parte, la industria de la construcción genera una gran cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD). En Europa se estima un volumen de 180 millones de toneladas por año en la producción de RCD (Gomes y De Brito, 2009), equivalente a unos 500 kg/habitante/año (Kenai y Debieb, 2011). En América Latina se calcula un promedio de 300 kg/habitante/año. En México, en el área de la costa del Mar Caribe, se tienen cifras de 254 kg/habitante/año en promedio (Domínguez, 2008). En el área del Distrito Federal se generan RCD del orden de 4000 ton/día; tales datos, indicadores de la magnitud del problema, pueden contrastarse en la Figura 2.

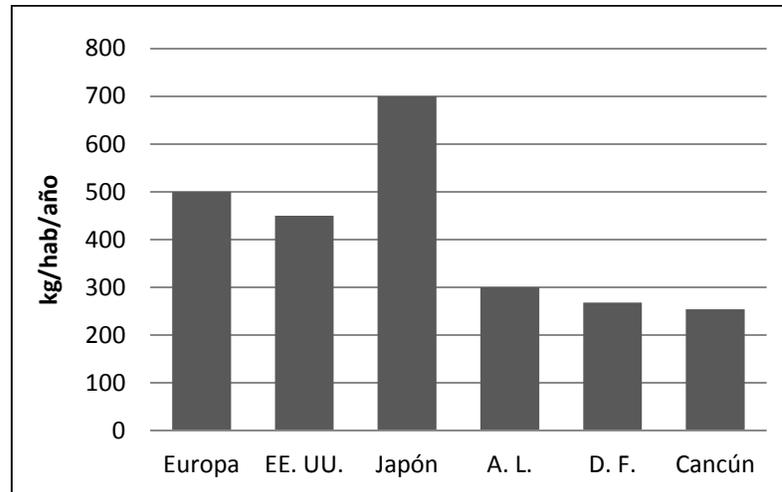


Figura 2. Generación de RCD en el mundo

Una buena alternativa para revertir esta problemática consiste en reciclar los RCD para producir agregados pétreos, gruesos y finos, que pueden ser utilizados en la fabricación de concretos de buena calidad. Muestra de ello se presenta en la comunidad Europea, donde se reciclan alrededor de 50 millones de toneladas al año, lo que representa el 28% en la producción de RCD. Cifras similares se tienen en Japón y Estados Unidos donde el volumen reciclado de RCD se aproxima al 30% y 20% al año, respectivamente (Müller, 2006).

Sin embargo, el uso de agregados reciclados para la producción de concreto estructural tiene sus limitaciones por el efecto negativo que puede tener en sus propiedades mecánicas (Khatib, 2005). Esto hace que su empleo como material de construcción aún no sea ampliamente aceptado, por lo que su uso se ha limitado a la construcción de trabajos secundarios como rellenos y sub-bases de carreteras. En las Figuras 3 y 4 se da muestra de ello con datos proporcionados en 2011 por la Agencia Federal de Administración de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés), donde se resalta la utilización de los agregados reciclados como materiales para bases de carreteras y para la fabricación de concreto, respectivamente, en distintos Estados de la Unión Americana.

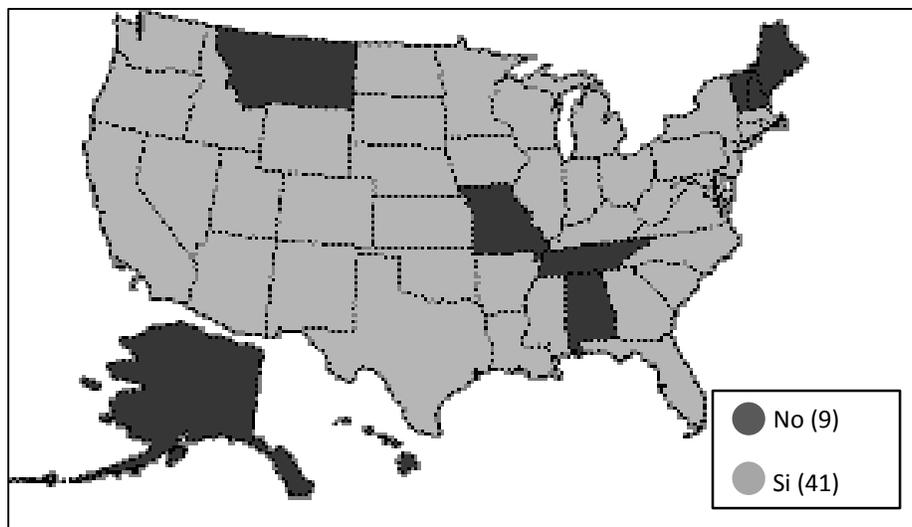


Figura 3. Uso de agregados reciclados para bases de carreteras

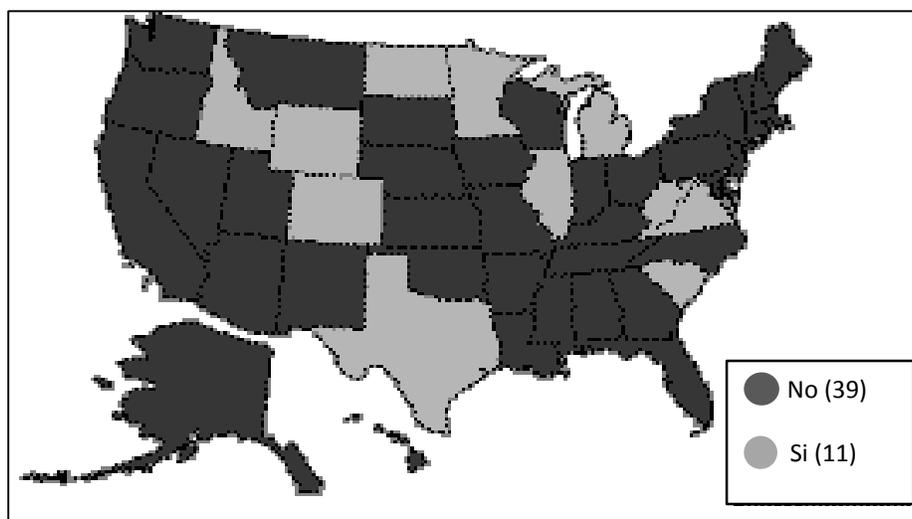


Figura 4. Uso de agregados reciclados para concreto

2. Planteamiento del problema

La industria de la construcción constituye un factor substancial de desarrollo para los países denominados economías emergentes, y por lo mismo la principal fuente generadora de residuos sólidos. El consumo de recursos naturales para sostener el crecimiento de esa industria aumenta día con día, contribuyendo al deterioro del medio ambiente, comprometiendo el progreso de las generaciones futuras.

Al igual que el concreto tradicional, el concreto con agregados reciclados se ve afectado en su durabilidad por la acción de cargas ambientales. Los costos asociados a problemas de durabilidad alcanzaron en 1986 la cifra de \$20 billones de dólares en los Estados Unidos. La variabilidad y diversidad de sus propiedades, así como la falta de consenso de normas y especificaciones técnicas para la producción y aplicación de concreto con agregados reciclados hacen que su uso se haya limitado a elementos de bajo desempeño, debido a su baja resistencia así como a sus características de alta porosidad y absorción que pueden afectar su durabilidad. No obstante, diversos trabajos de investigación han revelado que bajo ciertas condiciones se puede mejorar el comportamiento del concreto con agregado reciclado, en aplicaciones más allá de elementos secundarios no estructurales (Topçu y Sengel, 2004). En tal sentido se plantearon las siguientes hipótesis de trabajo y preguntas que han servido de guía en el desarrollo de esta investigación.

2.1. Hipótesis de trabajo

- El concreto fabricado con agregado grueso reciclado de alta absorción, en cierto rango de dosificación, es capaz de alcanzar propiedades mecánicas y características de durabilidad similares a un concreto normal de uso estructural, en forma sustentable.
- La emisión de bióxido de carbono equivalente en la producción de concreto con agregado grueso reciclado es menor en comparación a un concreto con agregados normales.

2.2. Preguntas de investigación

¿Cuál es la mezcla optimizada de materiales que permite lograr condiciones de durabilidad en un concreto con agregados gruesos reciclados de alta absorción?

¿Cuál es la diferencia en cuanto a propiedades mecánicas y características de durabilidad entre un concreto con agregados reciclados de alta absorción en comparación con un concreto con agregados normales?

¿Cuál es la huella de carbono de los concretos con agregados gruesos reciclados en comparación a un concreto con agregados normales?

2.3. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de concretos de uso estructural con agregado grueso reciclado de alta absorción desde un enfoque durabilidad de acuerdo con normas y/o criterios mexicanos e internacionales para concreto normal, en un marco de sustentabilidad.

2.4. Objetivos específicos

1. Determinar la composición de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) proveniente de los sitios de acopio de la materia prima.
2. Evaluar el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto con agregado grueso reciclado en comparación con un concreto normal.
3. Establecer los límites de reemplazo de agregados gruesos normales de cantera, por agregados reciclados provenientes de residuos de concreto, con objeto de minimizar los efectos negativos de este material reciclado en las propiedades del concreto a producir.
4. Evaluar la huella de carbono en los concretos fabricados como una medida de su sustentabilidad.

2.5. Justificación

La industria de la construcción constituye un factor substancial de desarrollo para los países denominados economías emergentes, y por lo mismo la principal fuente generadora de residuos sólidos, pues durante sus procesos se utilizan en gran medida diversos materiales asociados a otras industrias, como cemento, acero, piedra, cartón, vidrio, madera, aluminio, plásticos y cerámicas, entre otros. Por lo mismo, el consumo de recursos naturales, para sostener el crecimiento de esa industria, aumenta día con día, contribuyendo al deterioro del medio ambiente, comprometiendo el progreso de las generaciones futuras.

Por citar algunas cifras, en países desarrollados se ha reportado que la producción de residuos va de 520 hasta 760 kilogramos per cápita al año, sin considerar guerras ni desastres naturales (Domínguez et al., 2004). Los materiales pétreos y sus derivados como el concreto y las cerámicas son los que mayor peso tienen en la generación de residuos.

El concreto es un material 100% reciclable, siempre que no esté contaminado, y puede utilizarse en muchas estructuras diferentes cumpliendo con las especificaciones para los materiales agregados tradicionales. No obstante, al igual que el concreto tradicional, el concreto reciclado se ve afectado en su durabilidad por la acción de cargas ambientales. Las condiciones de exposición que acarrear los daños más comunes en el concreto provienen de los líquidos y gases que lo penetran, originando acciones químicas como la carbonatación y el ataque por cloruros, lo cual puede derivar en procesos de corrosión (Lamond, 1998).

La necesidad de reciclaje de los residuos de construcción concierne a todas las comunidades, industrializadas o no. Desde un enfoque ambiental es trascendente, pues evita la degradación de recursos naturales no renovables. No obstante, en vista de la diversidad y variabilidad de este tipo de materiales persiste una falta de consenso en el comportamiento de los concretos que pueden producirse, por lo que resulta necesario establecer la factibilidad de utilizarlos desde un punto de vista técnico, ambiental y económico.

2.6. Definición de términos

Concreto con agregados gruesos reciclados de origen calizo.- Concreto fabricado a base de Cemento Portland Compuesto, cualquier porcentaje en el contenido de agregado grueso de origen calizo (grava) producto del reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), arena y agua.

Concreto normal.- Concreto de referencia fabricado a base de Cemento Portland Compuesto, agregados pétreos naturales (grava y arena) y agua, diseñado con el procedimiento recomendado por el ACI.

Proporcionamiento de mezclas.- Proceso para seleccionar los materiales adecuados para el concreto y determinar sus cantidades relativas, con objeto de producir, tan económicamente como sea posible, un concreto con un mínimo de ciertas propiedades, de las cuales, las más destacadas son consistencia, resistencia y durabilidad.

Durabilidad del concreto.- Capacidad del concreto para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente (ACI-318-02).

Mezcla de materiales.- Proceso de producción o fabricación del concreto, ya sea en forma manual o con equipo especializado que implica aspectos de secuencia y tiempo en forma sistemática para lograr la hidratación apropiada del cemento a fin de alcanzar los valores esperados en sus propiedades de diseño.

Residuos de construcción y demolición.- Residuos de concreto macizo, mampostería y cerámica provenientes de procesos de construcción y/o demolición de obras civiles en la región de la Península de Yucatán.

3. Estado del Arte

En esta sección se analizan importantes trabajos de investigación que han sido desarrollados en los últimos 25 años, relacionados con el comportamiento de concreto fabricado con agregados reciclados. En la revisión de la literatura se ha puesto especial interés en las principales revistas científicas especializadas en la materia, siguiendo el trabajo de autores reconocidos en el estudio del concreto reciclado, tales como Hansen en Dinamarca, Buyle en Francia, Lamond en Estados Unidos, Xiao en China, Otzuki en Japón y Etxeberria en España, entre otros. Para facilitar la lectura, el texto ha sido organizado primeramente en aspectos relacionados con la naturaleza y características de los agregados, incluyendo las principales normativas internacionales y, posteriormente, con las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, considerando su comportamiento ante cargas ambientales y de durabilidad. Al final se incluye una síntesis que da pie al procedimiento experimental de la investigación.

3.1. Composición de los residuos de construcción y demolición

La composición de los residuos de construcción y demolición es muy diversa de un lugar a otro y depende de los procesos constructivos, materiales disponibles y costumbres de la población. Los componentes más comunes son: concreto y mortero, mampostería, pisos de cerámica, madera, plásticos y metales. Diferentes autores en varias partes del mundo, coinciden en que predominan los tres primeros, mismos que constituyen la materia prima principal para procesos de reciclaje, pudiendo alcanzar valores entre 30% y 40% del total de los residuos (Angulo et al., 2002; Oikonomou, 2005; Müller, 2006; Domínguez, 2008).

3.2. Producción de los agregados reciclados

La producción de agregados reciclados de concreto, finos y gruesos, es muy similar al de los agregados pétreos triturados provenientes de canteras o bancos de material. El proceso puede variar de unas plantas a otras dependiendo de las necesidades y destino final del producto. Una vez descargada la materia prima, las

operaciones que usualmente se requieren en planta para lograr agregados con granulometría adecuada son 5, a saber:

1. Separación manual de materiales contaminantes como madera, cartón, vidrio, acero y otros metales. Esta operación puede simplificarse cuando la materia prima procede de un proceso de demolición selectiva, consistente en la separación inicial de los materiales perjudiciales.
2. Control primario del tamaño del material seleccionado, por medio de cribas sucesivas de 160 mm, 80 mm y 40 mm.
3. Trituración primaria en planta fija, equipada con molino de impactos o trituradora de mandíbulas.
4. Separación magnética a la salida del molino para apartar los metales pequeños que no pudieron ser removidos en la primera etapa.
5. Trituración secundaria para reducir el tamaño y obtener la granulometría deseada.

Las plantas de producción pueden ser clasificadas de acuerdo con su movilidad en fijas, semifijas o móviles, o en cuanto a la tecnología utilizada en primera, segunda, o tercera generación. Las plantas fijas emplean sistemas de trituración de mandíbulas, molino de impactos o conos, y además incorporan sistemas para eliminación de impurezas y contaminantes finos como tierra, yeso y escayolas (Lamond 2002).

Las trituradoras de mandíbulas son las más empleadas para una trituración primaria por su alta capacidad de producción y bajo costo. Se caracterizan por la obtención de partículas de forma angulosa y baja cantidad de finos, inferior al 10% del material triturado (Figura 5).

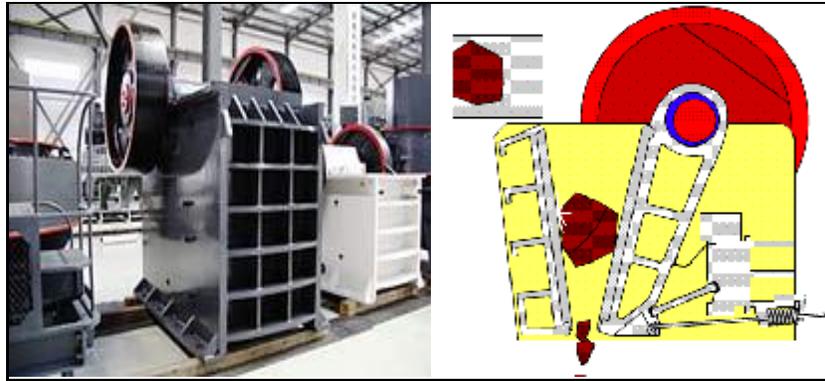


Figura 5. Esquema de trituradora de mandíbulas (SBM, 2012)

Las trituradoras de molino de impactos, por el contrario, pueden generar hasta un 40% de finos en mucho menos tiempo, lo que reduce los costos de inversión y operación. Sin embargo, los costos de mantenimiento pueden elevarse por el desgaste excesivo de los martillos (Figura 6).

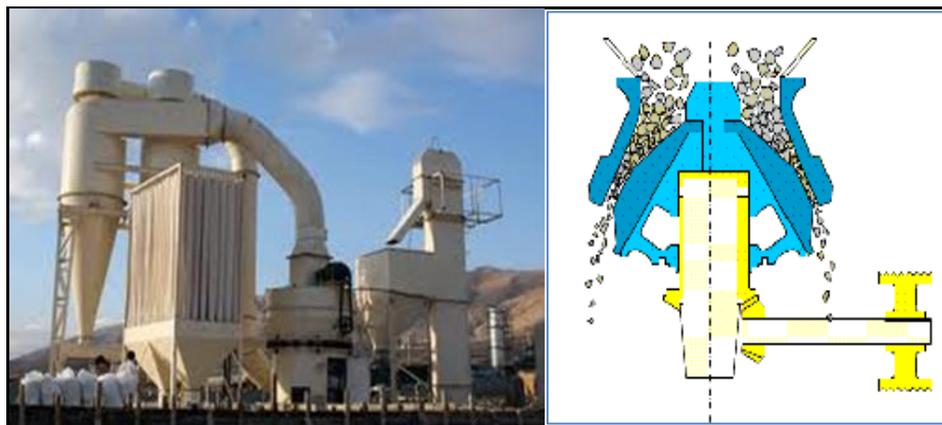


Figura 6. Esquema de trituradora de molino de impactos (SBM, 2012)

Las trituradoras de conos proporcionan buenos rendimientos sin incrementar los costos de operación y mantenimiento, generan alrededor del 20% de finos, pero tienen el inconveniente de no admitir tamaños grandes de partículas por lo que solamente se utilizan en procesos de trituración secundaria (Figura 7). Las plantas móviles usualmente son empleadas como complemento en plantas fijas para la producción de un solo tipo de agregado, ya sea fino o grueso.

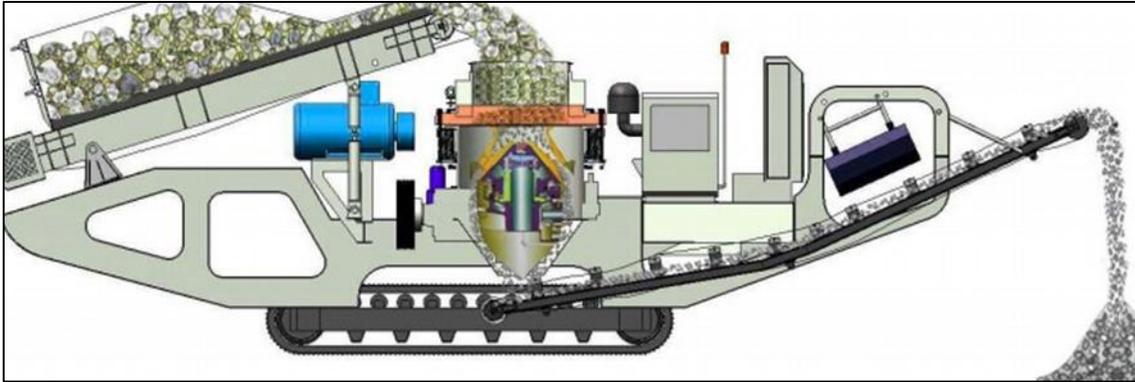


Figura 7. Esquema de trituradora móvil de conos (SBM, 2012)

La Asociación Europea de Demolición (1999) compara las características de los 3 sistemas de trituración, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de los sistemas de trituración para agregados

Característica	Mandíbulas	Molino de impactos	Conos
Capacidad	Alta	Media	Baja
Costo	Bajo	Medio	Alto
Desgaste	Bajo	Bajo	Alto
Calidad del producto	Bajo	Media	Alta
Contenido de finos	Bajo	Medio	Alto
Consumo de energía	Bajo	Medio	Alto

Las llamadas plantas de primera generación no cuentan con mecanismos para la eliminación de contaminantes con excepción de separadores magnéticos. Las de segunda generación tienen sistemas de limpieza del material antes y después del proceso de trituración. Las plantas de tercera generación son aquellas que permiten la reutilización de materiales secundarios que pueden contaminar los agregados reciclados, principalmente los metálicos como cobre, zinc, plomo, aluminio o aleaciones de ellos. Esta separación se efectúa por vía seca, ya sea en forma manual o magnética o por vía húmeda con chorros de agua a altas velocidades.

Otros procedimientos más sofisticados pretenden la remoción del mortero adherido mediante un tratamiento térmico en un horno rotatorio a una temperatura de 700 °C combinado posteriormente con la acción mecánica de un separador de aire y tamiz vibratorio que permite la obtención por separado de agregados gruesos, finos y polvo de cemento. No obstante, este sistema resulta costoso y poco habitual.

En la última década se ha ensayado con algunos tratamientos externos que mejoran la calidad del agregado grueso reciclado, como son los métodos de limpieza ultrasónica que remueven partículas sueltas para mejorar la unión de la nueva pasta de cemento y el agregado, o el método de impregnación con una solución de humo de sílice con objeto de incrementar su densidad (Katz, 2004).

3.3. Principales normativas para el uso de agregados reciclados

La utilización de residuos provenientes de procesos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de nuevos agregados en la producción de concreto data de la mitad del siglo pasado. Algunos países de la Unión Europea, Japón en Asia, Australia en Oceanía y Estados Unidos en América disponen de normativas para el empleo de agregados reciclados en la producción de concreto, las cuales se mencionan a continuación:

Reino Unido.

Se cuenta con la norma BS-EN 206-1 (2006), la cual clasifica los agregados por el tipo de residuo de donde proviene: a) Residuos de concreto, con un contenido máximo de impurezas (vidrio, plástico, asfalto, etc.) del 17%, donde se pueden alcanzar resistencias a la compresión de hasta 40 MPa, y b) Residuos cerámicos, destinados a elementos con resistencias probadas hasta 20 MPa.

España

La norma EHE-08 (2008) excluye definitivamente el uso de agregados finos reciclados para la fabricación de concreto. Tamaño mínimo permitido de 4 mm. Contenido de cloruros similar al permisible en agregados naturales. Contenido

máximo de cerámicas del 5% en peso del total de la muestra. Absorción máxima del agregado grueso del 7% cuando su límite de sustitución no sea mayor al 20%. En caso de que se rebase este límite, la absorción conjunta de ambos tipos de material no será superior al 5%.

Alemania.

La norma DIN 4226-100 establece cuatro tipos diferentes de agregado reciclado según su origen y contenido, ya sea concreto, agregados minerales, cerámica, y mezclas de ellos. Las aplicaciones recomendadas son para elementos de concreto de pobre calidad.

Japón.

Las normas JIS A 5021, JIS A 5022 y JIS A 5023 emitidas en 2005 regulan la producción y uso de los agregados reciclados. En ellas puede encontrarse la clasificación de dichos agregados de acuerdo con sus propiedades físicas, y contenido de impurezas. La de mejor calidad es la designada por la letra H que exige para el agregado grueso una densidad mayor a $2,500 \text{ kg/m}^3$, absorción menor al 3%, abrasión menor al 35% y contenido de ion cloruro menor al 0.04%.

Australia.

En Australia se cuenta con la norma HB 155-2002 emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Patrimonio, para el uso de agregados reciclados en elementos de concreto no estructurales, en la cual se exige una densidad mínima de 2100 kg/m^3 y una absorción no mayor al 6%.

Estados Unidos.

El Comité ACI 555R-01 (Lamond, 2002) clasifica los agregados como aquellos procedentes de a) concreto limpio, b) cerámica, c) mezcla triturada de concreto y cerámica sin presencia de otros contaminantes y d) mezcla triturada de concreto y cerámica con la presencia de ciertos contaminantes. Se exige que todos ellos posean dureza suficiente para lograr la resistencia a la compresión requerida y

granulometría apropiada para obtener buena trabajabilidad. En cuanto a su uso, se recomiendan para trabajos de rellenos en general, drenajes, bases y sub-bases de carreteras y fabricación de concreto, siempre y cuando los agregados provengan de elementos de concreto limpio, con menos del 5% de restos de ladrillo, cerámica y otros elementos contaminantes.

Otras normativas

La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM, por sus siglas en francés), recomienda para controlar indirectamente el contenido de impurezas, cantidades máximas del 10% de materiales con densidad inferior a 2200 kg/m³, del 1% con densidad inferior a 1800 kg/m³ y del 0.5% para residuos con densidad inferior a 1000 kg/m³ (1994).

En México, se tiene la norma NADF-007-RNAT-2004, la cual establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el Distrito Federal. Los residuos potencialmente reciclables para la obtención de agregados y material de relleno son prefabricados de mortero o concreto, concreto simple, concreto armado, cerámicos, concretos asfálticos, mampostería, prefabricados de arcilla recocida, bloques de concreto y mortero. Se establece la sustitución de por lo menos el 25% de los materiales vírgenes por materiales reciclados, siempre y cuando cumplan con las especificaciones técnicas del proyecto, y el costo sea el más conveniente. Las obras sugeridas son: sub-bases en caminos y estacionamientos, carpetas asfálticas para vialidades secundarias, terraplenes, rellenos sanitarios, andadores y ciclistas, lechos para tuberías, bases para guarniciones y banquetas, rellenos y pedraplenes, así como bases hidráulicas.

3.4. Características físicas de los agregados reciclados

3.4.1. Granulometría

Como se mencionó anteriormente, la granulometría de los agregados reciclados depende en gran medida del proceso de trituración. La cantidad de agregado grueso

varía entre el 70% y el 90% del material producido. Asimismo, influye el tamaño que tenía el agregado del concreto de procedencia. El tamaño de los agregados reciclados puede ser controlado siguiendo el procedimiento de la Norma Americana ASTM C 33.

3.4.2. Forma y textura superficial

Usualmente los agregados reciclados presentan formas angulosas debido al proceso de trituración y una apariencia áspera proporcionada por el mortero adherido a la superficie del material obtenido de los RCD. Otra característica aportada por el contenido de este mortero es el aumento de la porosidad y problemas de trabajabilidad en los concretos posteriormente producidos. Si el procedimiento de trituración empleado para ambos tipos de agregado es el mismo, el coeficiente de forma será similar. El mínimo requerido por varias de las normas internacionales aplicadas en la producción de agregados, como la francesa NFP 18-301 es de 0.20. La Norma Española UNE 7238:71 establece un rango entre 0.21 y 0.31 cuando se evalúa en conjunto el agregado grueso. En México, Martínez y Mendoza (2006) hallaron valores cercanos a 0.24 al experimentar con agregados reciclados provenientes de residuos de concreto premezclado.

3.4.3. Densidad y absorción

La densidad de los agregados gruesos reciclados puede reducir alrededor de un 10% comparado con un agregado grueso natural. Para lograrlo, deben emplearse dos etapas sucesivas de trituración, por ejemplo de mandíbulas y molino de impactos. Otra de las características físicas que se ve afectada por la cantidad de mortero adherido a la superficie de los agregados reciclados es la absorción, la cual puede alcanzar valores superiores al 10%, lo que sobrepasa los límites establecidos en muchas de las normas internacionales que se mencionan posteriormente. La Tabla 2 presenta una comparativa de agregados gruesos normales (A. N.) y agregados gruesos reciclados (A. R.), donde se muestran los valores de densidad relativa y absorción obtenidos por diversos autores en el contexto internacional en los últimos 10 años.

Tabla 2. Densidad y absorción de agregados gruesos normales y reciclados

Densidad Relativa		Absorción, %		Referencia
A. N.	A. R.	A. N.	A. R.	
2.70	1.54	2.47	3.98	Butler et al., 2011
2.82	1.50	2.51	3.50	Kenai y Debieb, 2011
2.82	0.40	2.52	9.25	Xiao et al., 2005
2.62	1.25	2.33	7.56	Poon et al., 2004
2.66	0.69	2.47	3.58	Otzuki et al., 2003
2.59	0.88	2.41	5.83	Gómez, 2002
2.89	2.39	1.00	5.60	Sagoe et al., 2001

3.4.4. Resistencia a la abrasión

Esta propiedad puede determinarse mediante *la Prueba de los Ángeles*, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 131. El coeficiente que se obtiene en el caso de agregados reciclados resulta superior en comparación al obtenido en agregados naturales debido a la pérdida de peso adicional que corresponde al mortero adherido (Hansen, 1986). En la Tabla 3 se presentan algunos resultados obtenidos por diferentes investigadores que demuestran lo anteriormente mencionado.

Tabla 3. Resistencia a la abrasión en agregados gruesos reciclados

Tamaño máximo mm	Resistencia a la abrasión, %		Referencia
	A. N.	A. R.	
20	30.7	42.7	Amorim et al., 2012
20	21.6	38.8	Rao et al., 2011
20	23.0	34.0	González et al., 2011
20	25.0	34.8	Zega et al., 2010
16	35.8	38.9	Sánchez, 2005
25	22.9	41.7	Tavakoli y Soroushian, 1996

3.5. Proporciónamiento del concreto con agregados reciclados

El objetivo de este proceso consiste en determinar las cantidades relativas de cemento, agua y agregados pétreos normales y reciclados para lograr cierta trabajabilidad del concreto en estado fresco y un valor específico de su resistencia a la compresión en estado endurecido. El método a emplear puede ser cualquiera de los utilizados para un concreto normal como el de factores empíricos del ACI o el de Contenido Mínimo de Vacíos. En cualquier caso, primeramente se deberán efectuar mezclas de prueba para hacer el ajuste de la dosificación final.

Durante este proceso es muy importante controlar la absorción y humedad de los agregados. La cantidad de agua requerida para el proporciónamiento puede ser mayor que en un concreto normal debido a la presencia del mortero adherido a la matriz rocosa del agregado. De acuerdo con Hansen (1986) el incremento de agua puede aumentar hasta un 10%, lo que deriva en otro factor que puede influir para mantener la resistencia y consistencia del concreto, como es el consumo de cemento, el cual puede aumentar hasta un 15% con respecto a un concreto normal. Este aumento también depende del porcentaje de remplazo de los agregados, sobre todo cuando se substituyen al 100% ambos tipos, finos y gruesos (Knight, 1998). Otro aspecto que debe cuidarse es la relación agregado fino/agregado grueso pues puede influir en la cohesión deseada del concreto. Autores como Sagoe, Brown y Taylor (2001) proponen 0.85 como un valor aceptable para esta relación.

En un trabajo desarrollado en Canadá (Fathifazl et al., 2009), se propuso un nuevo método para el proporciónamiento de mezclas de concreto con agregado reciclado (RCA) denominado *Volumen de Mortero Equivalente* (EMV por sus siglas en inglés), consistente en ajustar el contenido de mortero de la pasta, presumiendo que los agregados reciclados ya contienen cierta cantidad de mortero, evitando tratar en el diseño a los RCA como si fueran un material homogéneo, lo cual ocasiona una gran variabilidad de los resultados. Para ello determinan una relación agregado reciclado/agregado natural en los volúmenes de mezcla que les permite calcular el máximo contenido de RCA en la mezcla de acuerdo con el contenido de mortero residual. Los resultados mostraron que usando este método se logran mezclas con

características consistentes y propiedades comparables a las mezclas hechas con agregados normales. Sin embargo, sus resultados son muy limitados pues solamente analizan tres parámetros: revenimiento, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión.

Otsuki et al. (2003) propusieron un método de doble mezclado manual durante un lapso de 5 minutos, añadiendo el agua antes y después de la adición del cemento con la finalidad de mejorar la resistencia a la penetración de cloruros y CO₂ en el concreto elaborado a base de agregados reciclados. Para ello diseñaron 5 tipos de agregado reciclado y usaron 4 tasas de relación agua-cemento. Asimismo, examinaron el comportamiento de la zona de transición interfacial y encontraron que la calidad del agregado reciclado, en términos de la propiedad adhesiva del mortero, sólo afecta a la resistencia del concreto cuando la relación agua/cemento es baja.

El Comité ACI 555R-01 (Lamond et al., 2002) dedica un capítulo que provee algunas pautas para el proporcionamiento de mezclas de concreto con RCA, resumidas a continuación:

- En la determinación de la resistencia a la compresión utilizar una desviación estándar de 4.83 MPa.
- Determinar la relación agua-cemento en forma similar a un diseño de concreto normal cuando se utilice agregado grueso reciclado con arena normal.
- Considerar un 5% adicional de contenido de agua en comparación a un concreto normal con el mismo revenimiento.
- Calcular el contenido de arena en forma similar al diseño de un concreto normal.

3.6. Propiedades del concreto con agregados reciclados en estado fresco

En comparación con un concreto normal, el concreto fabricado con agregados reciclados es susceptible de experimentar varios cambios en sus propiedades en estado fresco. Dichos cambios se relacionan directamente con el aumento en la

capacidad de absorción de los agregados como consecuencia del mortero adherido a su superficie, mencionado en los párrafos que anteceden.

3.6.1. Consistencia

La consistencia es un indicador del comportamiento de la masa de concreto bajo diferentes condiciones de humedad, la cual puede variar de un estado muy fluido o agudo hacia un estado seco o rígido. Tradicionalmente se determina mediante la prueba de revenimiento siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 143.

En el caso de los agregados reciclados, al incrementarse la cantidad de agua absorbida durante el proceso de mezclado se produce una reducción de la relación efectiva agua/cemento, y por lo tanto un aumento en la consistencia, lo cual ocurre en los primeros 10 minutos posteriores al mezclado. Después de ese lapso, el comportamiento en cuanto a la absorción es muy similar al de un concreto normal. En la Figura 8 se comprara la consistencia de concretos con agregados normales y reciclados con la misma dosificación y granulometría.

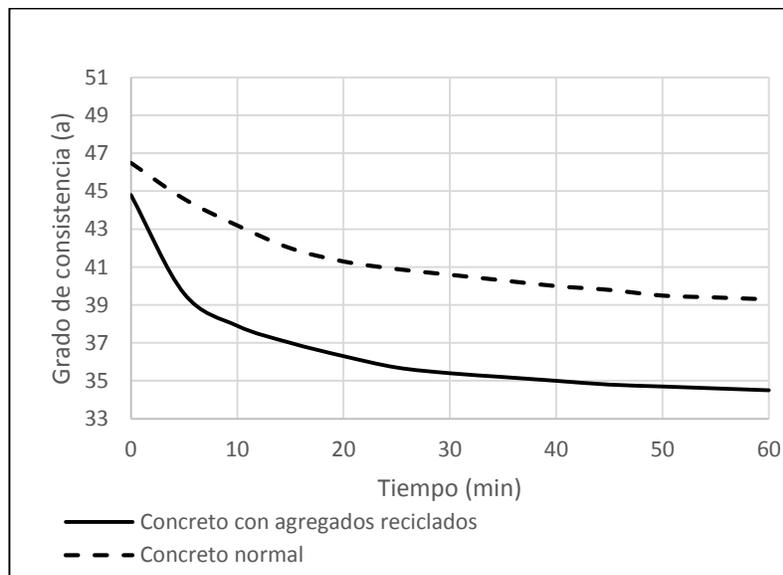


Figura 8. Consistencia en concretos normales y reciclados (Adaptada de Nealen y Rühl, 1997)

Para lograr determinada consistencia en la fabricación de concreto puede optarse por estimar la cantidad de agua adicional, mediante pruebas de afine, saturar los agregados antes del proceso de amasado, o utilizar un aditivo súper plastificante.

No obstante, en el caso de agregados reciclados, puede resultar difícil establecer un valor único de absorción dada la heterogeneidad del material. Por otra parte, la saturación de los agregados representa un problema logístico en la producción de concreto a nivel industrial y el uso de aditivos puede significar un costo adicional, además de propiciar otros problemas de tipo ambiental.

3.6.2. Densidad

Otra de las propiedades a estudiar en el concreto en estado fresco es la densidad, la cual comúnmente se determina siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 138. Cuando se substituyen los agregados normales por agregados reciclados de residuos de concreto el valor de dicho parámetro puede ser hasta un 5% menor tal y como lo plantearon Hansen y Narud (1983). En trabajos más recientes, Amorim et al. (2012) hallaron en su experimento una disminución de 2.41 t/m^3 a 2.3 t/m^3 , con revenimiento de 8 a 10 cm, similar a lo encontrado por González et al. (2012) quienes establecieron una pérdida de densidad 2.34 t/m^3 a 2.27 t/m^3 con revenimiento de 11 a 12 cm.

3.6.3. Contenido de aire atrapado

En cuanto al contenido de aire atrapado, varios autores coinciden en que la cantidad de éste, resulta mayor en el concreto fabricado con agregados reciclados (CR) en comparación a un concreto normal (CN). Este efecto puede atribuirse a que el mortero adherido a la superficie retiene fácilmente el aire en sus poros, sin embargo dicho argumento no ha sido suficientemente demostrado.

En la Tabla 4, se presentan algunos resultados donde se aprecia la variación de este parámetro entre ambos tipos de concreto. En la Figura 9 se muestra la apariencia de concretos reciclados con aire atrapado.

Tabla 4. Aire atrapado en concretos con agregados reciclados

Aire atrapado %		Referencia
CN	CR	
1.3	5.0	Kats, 2003
2.4	1.8, 2.3, 2.4	Sagoie et al., 2001
2.4, 3.1	3.8, 5.0	Müller, 1998
0.9	1.0	Hansen y Hedegård, 1984

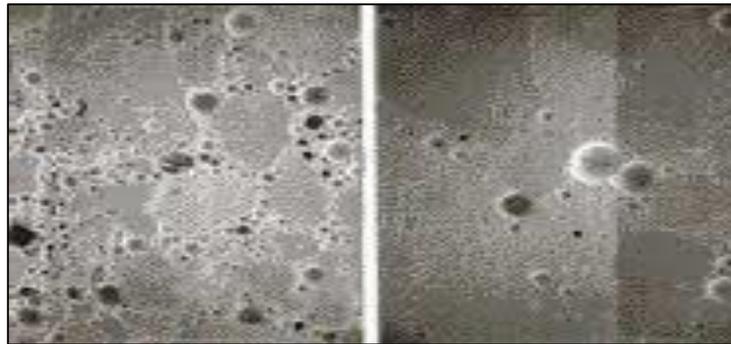


Figura 9. Apariencia de concretos con aire atrapado

3.7. Propiedades del concreto con agregados reciclados en estado endurecido

3.7.1. Resistencia a la compresión

Es sabido que los concretos fabricados con agregados reciclados ofrecen una menor resistencia a la compresión que un concreto normal con la misma relación agua/cemento, la cual puede variar entre 25% y 33% (Topçu y Sengel, 2004), y que esta disminución aumenta en la medida que se incrementa el porcentaje de sustitución del agregado grueso (AG) y del agregado fino (AF). Dicho efecto puede deberse a diversos factores como la cantidad de mortero adherido al agregado grueso reciclado, baja resistencia del agregado de origen, o por problemas de adherencia entre los agregados reciclados y el mortero nuevo, lo que hace que la disminución de la resistencia a la compresión entre un concreto normal y uno con agregados reciclados sea muy variable, como se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5. Resistencia a la compresión en concreto con agregados reciclados

Resistencia a la compresión MPa		Substitución %		a/c	Disminución %	Referencia
CN	CR	AG	AF			
32.4	20.4	100	--	0.50	37	Lovato et al., 2012
19.9	13.9	100	--	0.70	30	
32.4	24.3	--	100	0.50	25	
19.9	12.1	--	100	0.70	39	
43.8	35.6	100	--	0.50	19	Kou et al., 2011
59.3	54.8	--	100	0.45	8	Evangelista y Brito, 2010
40.0	35.0	100	--	0.45	13	Fathifazl et al., 2009
42.0	40.0	100	--	0.55	5	Etxeberria et al., 2007
46.7	39.2	--	25	0.50	16	Khatib, 2005
45.4	39.0	55	45	0.50	14	Gómez Soberón, 2002
42.1	29.1	100	100	0.60	30	Kats, 2003

Esta influencia de los agregados en la resistencia a la compresión ha llevado a investigar por separado el comportamiento de concreto con distintos porcentajes de reemplazo del agregado reciclado, tanto grueso como fino, pero sin llegar a un consenso sobre la proporción adecuada debido a la heterogeneidad del material en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas. De hecho, la mayoría de los estudios indican que en las pérdidas de resistencia influye el empleo de partículas de agregado menores a 2 mm. Hansen (1986) ha enfatizado que se debe evitar el uso de agregados finos reciclados. A este respecto, Nataatmadja y Tan (2001) en Australia, presentaron resultados de su trabajo con agregados reciclados de concreto (RCA) obtenidos por trituración. Los especímenes fueron sometidos a la prueba triaxial con repetición de carga un día después de su compactación. Se determinó que la resistencia puede verse afectada significativamente debido al contenido de finos (10%).

Rao et al. (2011) investigaron en Kharagpur, India, la influencia de diferentes cantidades de agregado grueso obtenido de la demolición de alcantarillas de concreto de 15 años de antigüedad, en las propiedades del concreto con agregado reciclado. Utilizaron diferentes tasas de reemplazo del agregado normal por agregado reciclado (25%, 50% y 100%) en las mezclas de concreto. Sus resultados mostraron valores altos de absorción y baja densidad, lo cual podría ser una ventaja en el caso de diseño de estructuras ligeras. Su comportamiento a la tensión y compresión alcanzó valores del 50% en comparación con un concreto normal.

Etxeberria et al. (2007) estudiaron la influencia de la cantidad de agregado grueso en algunas propiedades del concreto producido con agregado reciclado empleando límites de sustitución de 25%, 50% y 100%. Concluyeron que el remplazo de 100% del agregado normal por reciclado propicia una pérdida del 20 al 25% en la resistencia a la compresión alcanzada por un concreto de referencia con la misma relación agua/cemento.

Kenai y Debieb (2011) en Argelia, ensayaron muestras de concreto elaborado con agregados reciclados finos y gruesos provenientes de ladrillos y concreto triturado con remplazos parciales del 25%, 50%, 75% y hasta 100% del agregado normal. Los resultados fueron los esperados para este tipo de material: altos valores de absorción y permeabilidad (casi el doble de un concreto normal). La resistencia a la compresión estuvo alrededor de 20 MPa a una edad de 90 días.

Dichas condiciones desfavorables de resistencia motivaron para que varios investigadores se enfocaran al estudio de aplicaciones de bajo desempeño, como la construcción de pavimentos flexibles a base de emulsiones (Pérez et al., 2007). Dicho trabajo consistió en la dosificación de mezclas bituminosas con agregados reciclados de residuos de construcción y demolición. Encontraron que las propiedades mecánicas son parecidas a las de aquellas mezclas fabricadas con materiales naturales de cantera. Sin embargo, experimentaron una disminución de la resistencia por pérdida de cohesión debida a la acción del agua, atribuida a una mala selección de los materiales.

Por su parte, Chini et al. (2001) evaluaron el comportamiento de materiales reciclados de concreto para base de pavimento con mezclas asfálticas en caliente y como agregado de cemento Portland en pavimentos rígidos. Comprobaron que en la medida que aumenta el porcentaje de RCA en las muestras, disminuye la resistencia a esfuerzos de flexión y compresión.

Resultados parecidos se encontraron en Sevilla, España, donde Huete y Blandón (2004) se avocaron a la caracterización de material reciclado de residuos cerámicos de construcción, determinando que el material granular obtenido es apto para distintas aplicaciones en la industria de la construcción como sub-bases de carreteras, firmes de grava-cemento y agregados para empedrados y engravillados.

Otros estudios se han orientado a la obtención de material pétreo producto de los procesos de construcción y demolición para la producción de concreto. Con este enfoque, Khalaf y DeVenny (2004) en el Reino Unido, pretendieron demostrar que el material reciclado de escombros de albañilería, especialmente de ladrillos, con una densidad relativa aproximada de 2.0 y porosidad entre 15% y 25%, puede ser utilizado solamente en la fabricación de concreto de segunda categoría.

3.7.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto es considerado como una de las propiedades más importantes en el diseño de elementos estructurales. Tradicionalmente se determina mediante el método de prueba de la norma ASTM C 469. En el caso de concretos con agregados reciclados, diversos autores han hallado reducciones entre 7 y 35% en comparación a un concreto normal (Tabla 6), lo cual se debe principalmente a la disminución del módulo de elasticidad del agregado grueso reciclado, ocasionado por la textura rugosa y la presencia de fisuras en el mortero adherido.

En comparación con un concreto normal, el módulo de elasticidad puede verse reducido hasta 33% cuando se utilizan agregados gruesos reciclados, y hasta 40% cuando se emplean a la vez agregados reciclados, gruesos y finos. Por su parte la fluencia puede aumentar entre 30 a 60%, lo cual no es sorprendente, pues el

concreto elaborado con agregados reciclados contiene hasta un 50% más de volumen de pasta y la fluencia es proporcional al contenido de pasta o mortero en el concreto (Hansen 1986).

Tabla 6. Módulo de elasticidad en concreto con agregados reciclados

Módulo de elasticidad GPa		Reemplazo %		a/c	Disminución %	Referencia
CN	CR	AG	AF			
31.2	20.4	100	--	0.43	35	Rao et al., 2011
35.5	28.9	--	100	0.45	19	Evangelista y Brito, 2010
30.0	27.5	100	--	0.45	8	Fathifazl et al., 2009
32.6	27.8	100	--	0.55	15	Etxeberria et al., 2007
34.5	29.7	55	45	0.50	14	Gómez Soberón, 2002
23.1	11.5	100	100	0.60	50	Katz, 2003
27.0	26.5	100	--	0.45	2	Limbachiya et al., 2000

3.7.3. Resistencia a la tensión

Similar a lo que se obtiene en concretos de peso y resistencia normal, la resistencia a la tensión en concretos con agregados reciclados es muy baja en comparación a los valores de resistencia a la compresión. Sin embargo, esta reducida capacidad, permite disminuir los agrietamientos que pudieran producirse por cambios volumétricos. La capacidad a tensión se obtiene en forma indirecta mediante la prueba *Brasileña*, que se puede realizar según la norma ASTM C 496 o su equivalente NMX-C-163 *Tensión por Compresión Diametral*.

Los estudios consultados, mostrados en la Tabla 7, revelan valores muy dispersos, lo cual se atribuye a la variabilidad en las propiedades del concreto de donde provienen los agregados.

Tabla 7. Resistencia a la tensión en concreto con agregados reciclados

Resistencia a la tensión MPa		Substitución %		a/c	Variación %	Referencia
CN	CR	AG	AF			
2.43	2.26	100	--	0.50	-7	Kou et al., 2011
2.67	2.03	100	--	0.43	-24	Rao et al., 2011
3.85	2.95	--	100	0.45	-23	Evangelista y Brito, 2010
2.49	2.72	100	--	0.55	+8	Etxeberria et al., 2007
4.10	3.70	55	45	0.50	-10	Gómez Soberón, 2003
5.00	2.70	100	100	0.60	-46	Katz, 2003

3.8. Propiedades relacionadas con la durabilidad

La fabricación de elementos de concreto con material reciclado de residuos de la construcción puede tener el inconveniente de valores altos de porosidad, redundando en problemas de durabilidad, principalmente por la penetración de cargas ambientales como son los cloruros y el bióxido de carbono (CO₂). Las condiciones de exposición que acarrear los daños más comunes en el concreto provienen de los líquidos y gases que lo penetran, originando acciones químicas que derivan en la corrosión del acero de refuerzo (Lamond, 1998).

Durante muchos años se pensó que las construcciones hechas con concreto tendrían una vida ilimitada, y los diseñadores y constructores estuvieron principalmente interesados en las características asociadas con la resistencia mecánica del material. A partir de 1980 se empezó a analizar el hecho de que muchas construcciones no estuvieran manteniendo la seguridad y utilidad requeridas durante un tiempo suficientemente largo. Los costos asociados a problemas de durabilidad alcanzaron en 1986 la cifra de \$20 billones de dólares en los Estados Unidos. Otros países, como el Reino Unido destinan el 40% de su inversión en la industria de la construcción para trabajos de reparación y

mantenimiento de elementos estructurales de concreto (Neville y Brooks, 2010). Estadísticamente resulta difícil determinar las causas de problemas de durabilidad en estructuras de concreto. A principios de la década de los 80's se realizó en España un estudio cuyos resultados atribuyen un 16% de las causas a los materiales, 30% a procesos constructivos y el 45% a problemas que se acarrean desde el diseño (Hernández y Mendoza, 2006).

En materia de normatividad, el aspecto de durabilidad ha sido incluido en los reglamentos de construcción de países como Japón, Australia y Nueva Zelanda, así como en países de la Unión Europea. En México, la norma NMX C-403 contiene un apéndice sobre durabilidad (1999), y en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal se incluyó un apartado sobre el tema en la versión de 2004.

3.8.1. Porosidad y absorción

Como fue planteado anteriormente, el deterioro del concreto por causas distintas a las mecánicas se debe principalmente a la presencia de agua con sustancias nocivas en forma disuelta. La penetración y transporte del agua hacia el interior del concreto se realiza a través de los poros y fisuras en el material y depende del tipo, tamaño y distribución de dichas oquedades. Al utilizar agregados reciclados, finos y gruesos, en la fabricación de concreto, puede esperarse que aumenten los valores de porosidad, absorción y permeabilidad, en la medida en que se incrementa también el porcentaje de sustitución de los agregados normales por agregados reciclados.

Generalmente, la porosidad tiene gran influencia en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Representa el total de huecos existentes en el material, es decir, tanto en la pasta de cemento como en los agregados. Puede ser determinada en laboratorio por diferencia de pesos de las muestras secas al horno y saturadas por inmersión de acuerdo con la norma ASTM C 642, o aplicando una técnica por intrusión de mercurio (Gómez Soberón, 2003).

De acuerdo con el CEB-1998 (Sánchez de Juan, 2004) la calidad del concreto en cuanto a porosidad puede clasificarse en:

- Buena, si es menor a 15%
- Media, si se encuentra entre 15 y 17%
- Pobre, si es mayor a 17%

Estos criterios de evaluación son similares a los establecidos por la Red DURAR (2000):

- $\leq 10\%$ Indica un concreto de buena calidad y compacidad.
- 10% a 15% Indica un concreto de moderada calidad.
- $>15\%$ Indica un concreto de durabilidad inadecuada

Sin embargo, cuando se emplean agregados con alta absorción, la porosidad puede no ser un buen indicador de la calidad del concreto, pues los cambios en la porosidad de la pasta al hacer variar la relación agua/cemento no son apreciables (Solís y Moreno, 2006).

En un trabajo reciente, desarrollado en São Paulo, Brasil (Angulo et al., 2010) se estudió el efecto de la porosidad del agregado grueso reciclado de construcción y demolición en el comportamiento mecánico del concreto. En el diseño de mezclas, clasificaron el agregado de acuerdo con su porosidad a fin de evitar variabilidad en los resultados. Para distintos valores de resistencia a la compresión (10 a 40 MPa) encontraron un incremento significativo en el consumo de cemento, directamente proporcional con el aumento de la porosidad. Concluyeron que desde el punto de vista ambiental y financiero, el reemplazo del 100% de agregado normal por reciclado puede ser negativo por el incremento en el consumo de cemento.

Kou et al. (2011) en Japón, presentaron los resultados de un trabajo de investigación cuyo objetivo fue determinar las propiedades mecánicas y la estructura de poros en especímenes de concreto, preparados con agregados reciclados después de 5 años de curado. Se usaron dos tipos de agregados reciclados provenientes de granito triturado y escombros de concreto. Como se esperaba, el concreto tuvo una baja

resistencia a la compresión, pero a cambio tuvo un desempeño a la tensión simple más alto que el concreto elaborado con agregados normales, así como valores bajos de porosidad.

Para determinar la absorción usualmente se utiliza cualquiera de dos técnicas tradicionales, mediante algún método de inmersión (ASTM C 642 o BS 1881-122), o por un método de ascensión capilar que permite estimar, además de la porosidad, el radio medio de poros (Zarahieva et al., 2003).

Sin importar los métodos empleados, diversos resultados hallados en la literatura en los últimos 10 años, muestran aumentos de más del 30% en el caso de la porosidad y más del 40% en el caso de la absorción, como se ilustra en la Tabla 8.

Tabla 8. Porosidad y absorción en concretos con agregados reciclados

Porosidad, %			Absorción, %			Referencia
CN	CR	Aumento	CN	CR	Aumento	
13.4	18.0	34	5.9	8.4	42	Gómez, 2002
7.2	11.2	55	--	--	--	Zaharieva et al., 2003
13.6	17.8	31	6.1	8.4	38	Levy y Helene, 2004
12.8	16.1	26	5.6	7.5	34	Villagrán et al., 2008
--	--		7.2	8.3	14	González et al., 2011
--	--		5.6	7.4	33	Rao et al., 2011

3.8.2. Absorción capilar

La absorción capilar en una muestra de concreto proporciona un valor de su porosidad efectiva. Representa el incremento en la masa del espécimen de prueba como resultado de la absorción de agua por los poros capilares. Cuando se determina en función del tiempo se le denomina velocidad de absorción capilar o sorptividad, y puede ser un parámetro importante para medir el desempeño de los concretos ante el efecto de cargas ambientales. La Red DURAR (2000) recomienda un valor de sorptividad menor o igual a $3 \text{ mm/h}^{0.5}$ para recubrimientos de 30 mm en

ambientes severos, y hasta de $6 \text{ mm/h}^{0.5}$ en medios menos agresivos. Otros autores como Olorunsogo y Padayachee (2002) han calificado conservadoramente la sorptividad para concretos con agregados reciclados, en rangos que van de 6 a $15 \text{ mm/h}^{0.5}$. Comúnmente esta propiedad se determina en laboratorio con el método de prueba ASTM C-1585-04 o por el Método Noruego propuesto por Fagerlund (1986).

3.8.3. Permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad en el concreto se efectúan para determinar un coeficiente que describe el flujo de líquidos o gases a través de los poros permeables del material. El experimento puede realizarse mediante una técnica de penetración que consiste en inyectar agua a presión constante sobre alguna de las caras de una probeta de concreto durante un lapso de tiempo determinado, a cuyo término se rompe en forma longitudinal para medir la profundidad media del frente de penetración. Otro método disponible, conocido como *permeabilidad al aire*, desarrollado en Francia en 1966, estriba en provocar un vacío en una cámara conectada con la probeta de concreto para crear un gradiente de presiones que provoca el flujo de aire a través de la probeta. Este flujo ejerce presión sobre un tubo capilar relleno de agua (Figura 10).

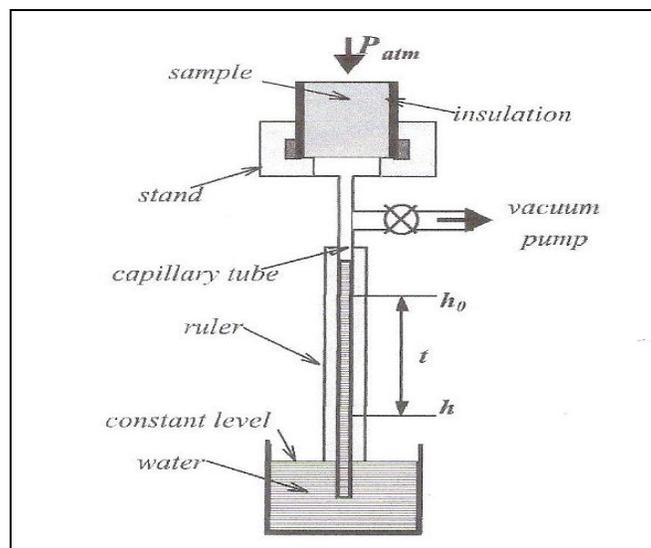


Figura 10. Arreglo para el ensayo de permeabilidad al aire (Buyle y Hadjieva, 2002)

Cuando se compara el comportamiento del concreto fabricado con agregados gruesos reciclados respecto a un concreto normal, se han determinado aumentos en los coeficientes de permeabilidad tanto en pruebas al aire como en agua, que fluctúan entre 40% y 80% (Limbachiya et al., 2000, Buyle y Hadjieva, 2002, Zaharieva et al., 2003).

En su revisión del estado del arte (1986), Hansen encontró que el concreto hecho con agregados gruesos reciclados con relación agua/cemento de 0.5 a 0.7 puede tener una permeabilidad de 2 a 5 veces más que los concretos normales, sin embargo esto puede ser compensado aumentando el contenido de cemento.

Los resultados anteriores contrastan con el trabajo realizado por Tam y Tam (2007), quienes evaluaron la durabilidad del concreto con agregado reciclado utilizando un método de fabricación de 2 fases denominado TSMA, el cual consiste en la adición de agua en dos momentos (antes y después de agregar cemento) en un ciclo total de mezclado de 250 segundos, diseñado con objeto de mejorar el comportamiento de la zona de transición interfacial. Emplean en su experimento, cemento portland ordinario, así como agregados finos y gruesos triturados, provenientes de una planta de reciclado en Hong Kong. Sus resultados revelan que con dicho método mejora 38% los valores de permeabilidad al aire y 3% los de permeabilidad al agua.

Un método alternativo de permeabilidad al aire fue desarrollado por Torrent, incluido como norma en Suiza (SIA 262/1-E: 2003). Se basa en crear vacío dentro de una celda de doble cámara que se coloca sobre la superficie del concreto y en medir la velocidad con que la presión retorna a su valor atmosférico. El flujo unidireccional de aire hacia la cámara central (de medición) se asegura con la cámara exterior (anillo de guarda) para eliminar cualquier flujo indeseable transversal (Figura 11).

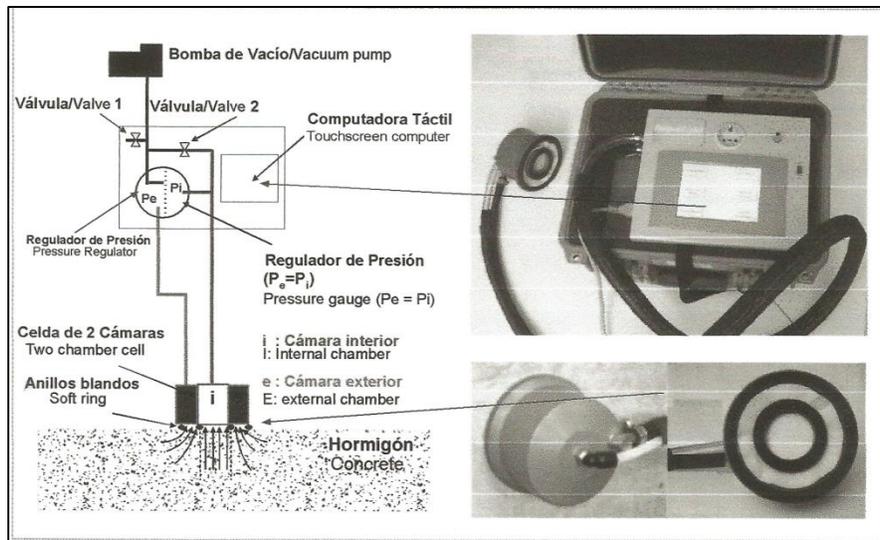


Figura 11. Esquema y detalles del Método Torrent (1999)

La aplicación de este método permite obtener valores del coeficiente de permeabilidad (kT) que califica la calidad de la superficie de concreto (Tabla 9).

Tabla 9. Calificación de la calidad de la superficie de concreto

Clase	Coefficiente de permeabilidad $kT (10^{-16} m^2)$	Calificación
1	<0.01	Excelente
2	0.01-0.1	Muy buena
3	0.1-1	Normal
4	1-10	Pobre
5	>10	Muy mala

3.8.4. Carbonatación

Otro de los agentes ambientales asociado a problemas de durabilidad en el concreto es la carbonatación, proceso en el cual se deteriora la capa pasiva de óxidos que protege al acero, dando paso a la corrosión. La carbonatación es un fenómeno que conlleva la disminución de alcalinidad del concreto en forma importante. Para

determinar su presencia en el concreto, se utiliza un método consistente en el tratamiento de una superficie acabada de romper con una solución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico con objeto de observar la coloración rosada que se adquiere en ausencia de la carbonatación a ciertas profundidades. En realidad la prueba de fenolftaleína da una medida del pH. Esta solución es incolora para valores de pH inferiores a 8. Para valores superiores a 9.5 se torna color rojo púrpura y para valores entre 8 y 9.5 la coloración es de color rosado (Andrade et al., 1988). La carbonatación ocurre progresivamente desde el exterior del concreto expuesto al CO_2 , pero lo hace a una rapidez decreciente pues el CO_2 se ha de difundir a través del sistema de poros, que incluye la zona superficial carbonatada del concreto, tal difusión es un proceso muy lento si los poros de la pasta de cemento hidratado están llenos de agua.

En un trabajo desarrollado en Portugal, Gomes y De Brito (2009) prepararon especímenes de concreto estructural elaborado con agregados reciclados, provenientes de A) concreto producido en laboratorio, triturado a una edad de 35 días, así como B) residuos de ladrillos huecos, con dos capas de mortero de cemento-arena, producto de la demolición de un muro con edad aproximada de 6 meses. Utilizaron diferentes porcentajes de sustitución del agregado. Sus resultados fueron presentados en términos de durabilidad: absorción, carbonatación y resistencia a la penetración de cloruros. Encontraron un aumento significativo en la absorción del agua para las muestras tipo B para una tasa de remplazo mayor al 50%. La profundidad de carbonatación en las mezclas de concreto con agregado reciclado, a una edad de 90 días, no mostró ninguna diferencia significativa en comparación al concreto normal (sin ningún tipo de agregado reciclado), lo cual puede atribuirse al corto tiempo de exposición.

El efecto de los agentes ambientales, como ya se dijo antes, puede ser tardado. La velocidad de carbonatación está sujeta a la facilidad de penetración del CO_2 que a su vez depende del medio (humedad relativa y concentración del CO_2), de las características del concreto (humedad, composición, tipo de cemento utilizado y relación agua/cemento), y de la presencia de fisuras. Por ello, autores, como

Papadakis et al. (1991), San Juan et al. (2003) y Moreno et al. (2004), han empleado cámaras de carbonatación acelerada donde se inyecta CO_2 y se controlan las condiciones de temperatura y humedad, obteniendo resultados bastante apegados a la realidad.

Levy y Helene (2004) en Brasil, presentaron un trabajo consistente en estudiar la durabilidad de concretos reciclados fabricados con agregados provenientes de residuos de mampostería de un año de antigüedad y de residuos de concreto con agregado granítico triturado después de 6 meses de edad. Se consideraron 3 propiedades de estudio: capacidad de absorción, porosidad y resistencia a la carbonatación. El diseño de mezclas se realizó utilizando un nomograma que combina la relación agua/cemento, contenido de cemento, relación cemento/agregado y resistencia a la compresión. Se emplearon reemplazos del agregado normal por agregado reciclado en 0, 20, 50 y 100%.

Los resultados revelaron, para todos los reemplazos, un comportamiento similar, en cuanto a trabajabilidad y resistencia a la compresión (28 días) del concreto reciclado, y del concreto de referencia en el rango de 20 a 40 MPa. El mínimo valor de absorción (alrededor del 7%) y volumen de poros (cercano al 12%) se encontró para aquellos especímenes con reemplazos del agregado natural de 20%. Para todas las otras condiciones el aumento en el % de reemplazo significó un aumento en la porosidad total y la absorción. Por otra parte, la profundidad de carbonatación fue menor cuando se tuvieron reemplazos del 20% y 50% y hasta del 100% en especímenes fabricados con residuos de mampostería, lo cual se atribuye a que la penetración de CO_2 depende esencialmente de la composición química del material y no sólo por sus características físicas.

Al final concluyeron que cuando el agregado normal es reemplazado por el 20% del agregado reciclado de mampostería y concreto, el comportamiento del concreto reciclado será muy similar y algunas veces mejor que el concreto normal, por lo cual su uso podría contribuir a la preservación del medio ambiente con menores costos de producción.

Recientemente Xiao et al. (2012) presentaron una revisión general de los estudios sobre concreto fabricado con agregados reciclados en China para el período 1996-2011, donde se confirma en gran medida los resultados resumidos por Hansen y otros autores. Entre otras cosas, la reducción de la resistencia a la carbonatación y penetración de cloruros, así como el incremento de la fluencia y contracción por secado. Ellos hacen énfasis en la necesidad de optimizar el diseño de mezclas de concreto con este tipo de agregado para lograr requisitos de resistencia y trabajabilidad.

3.8.5. Penetración de cloruros

El ion cloruro (Cl^-) es uno de los principales agentes ambientales capaz de provocar un proceso de corrosión en las armaduras de acero embebidas en los elementos de concreto y por ende reducir su durabilidad. La penetración de cloruros en el concreto se puede presentar por difusión en estructuras sumergidas en agua salada o por succión capilar si la estructura se encuentra expuesta a las condiciones del aire húmedo marino. En laboratorio el efecto puede inducirse por inmersión de las probetas en agua sintética de mar, por exposición en una cámara de niebla salina, o por migración de los cloruros, forzando su ingreso bajo la acción de un campo eléctrico externo. Según la Red DURAR (2000), la concentración aceptada para fines de durabilidad no debe ser mayor a 0.4% por peso de cemento.

Algunos autores como Villagrán et al. (2008), estudiaron la influencia del agregado grueso reciclado en el índice de penetración de los cloruros en muestras expuestas al ambiente marino en periodos de 6, 12 y 18 meses. Los especímenes consistieron en prismas rectangulares cubiertos lateralmente con al menos 3 capas de pintura acrílica impermeable. Una de las caras quedó expuesta sin pintar para permitir el ingreso unidireccional de los cloruros. Las condiciones atmosféricas fueron: temperatura media anual de 15°C con fluctuaciones diarias entre 3° y 27°C , humedad relativa del 80% y precipitación anual del orden de 900 mm. Para el diseño de mezclas se utilizaron 2 tipos de cemento: Cemento Portland Ordinario (CPO) y Cemento Portland Compuesto (CPC), 2 tipos de agregado grueso: triturado

reciclado con gravedad específica de 2.46 y 4.6% de absorción, y triturado normal de granito con gravedad específica de 2.69 y 0.3% de absorción, y relaciones agua/cemento de 35, 40, 45 y 50%. Los resultados revelaron poca variación en cuanto a la resistencia a la compresión en todos los especímenes. Aunque la porosidad total en el concreto reciclado fue un 20% más que en el concreto normal, no influyó en la penetración de cloruros, la cual dependió principalmente de la relación agua/cemento.

En otro trabajo, Carvajal et al. (2004) en Chile, sometieron en un ambiente marino simulado una serie de probetas fabricadas con distintos tipos de cemento, para estudiar el efecto de penetración de los cloruros y el potencial de corrosión. Los resultados estuvieron muy apegados a lo esperado, pues a menor razón agua/cemento en las mezclas, se observó una menor penetración de cloruros.

3.8.6. Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos se origina por la reacción del ion sulfato con el aluminato tricálcico hidratado que proviene del cemento, formando un sulfoaluminato de calcio hidratado conocido como etringita, la cual causa agrietamiento del concreto. La presencia de dicho agente puede determinarse por un método gravimétrico, mediante precipitación con BaCl a partir de digestión ácida.

En el caso del concreto con agregados reciclados puede esperarse un aumento en el contenido de sulfatos, procedentes de la pasta de cemento o por la incorporación de impurezas como el yeso, que podrían estar presentes en los materiales utilizados como materia prima durante el proceso de producción de los agregados. Sin embargo, los estudios sobre sus efectos en concretos de este tipo son escasos, y dispersos.

Limbachiya et al. (2004) prácticamente no encontraron diferencias en la expansión por sulfatos cuando emplearon substituciones de agregado grueso del orden del 30%. Para substituciones de agregado por encima del 50% determinaron que la expansión se incrementa más del 40%.

Por otra parte, Villagrán et al. (2012) publicaron sus resultados sobre la penetración del ion sulfato en concretos reciclados con aire incluido, donde reportaron diferencias muy pequeñas en comparación a un concreto normal.

Cabe mencionar que las concentraciones de sulfatos presentes en el material calizo predominante en la Península de Yucatán, perteneciente a la formación geológica denominada *Carrillo Puerto*, son del orden de 0.004% y se consideran despreciables (Pacheco y Alonzo, 2003).

3.8.7. Congelamiento-descongelamiento

El deterioro del concreto debido a ciclos repetidos de congelamiento-descongelamiento se origina en la pasta de cemento como consecuencia del aumento de volumen que sigue a la formación de hielo, de la variación del punto de congelación del agua en función del diámetro de los poros y de la existencia de difusión de las moléculas de agua hacia los cristales ya formados. Se esperaría que el desempeño del concreto reciclado ante el congelamiento sea inferior en comparación a un concreto normal, debido a la mayor cantidad de agua que puede absorber. Sin embargo, eso no siempre sucede, pues en algunos trabajos se ha comprobado que la mayor porosidad de los agregados reciclados provee al concreto una mejor distribución de poros para resistir las presiones provocadas por la formación de hielo, obteniendo resistencias similares y hasta ligeramente mayores que en un concreto normal (Sánchez de Juan, 2004).

3.8.8. Reacción álcali-agregado.

Consiste en una reacción deletérea en la que intervienen ciertas rocas y minerales, que algunas veces se encuentran en los agregados, y los óxidos de sodio y de potasio (denominados álcalis) que regularmente ingresan a la solución de poro del concreto, provenientes del cemento. Su determinación en laboratorio se efectúa mediante los métodos de las normas ASTM C 227-03, ASTM C 289-07 y ASTM C 586-05. Son tres los tipos de reacción álcali-agregado que se conocen: Álcali-Sílice, Álcali-Silicato y Álcali-Carbonato. Estos productos de reacción se expanden en

presencia de agua y pueden producir fracturas en el concreto. No obstante, para que esto suceda deben concurrir tres condiciones básicas:

- Presencia crítica de minerales en los agregados que reaccionan con los álcalis del cementante.
- Suficiente proporción de álcalis disponibles en la solución de poro del concreto en condiciones de reaccionar con dichos agregados.
- Alto contenido de humedad en el concreto, ya sea en forma permanente o alternada con periodos de secado.

En la Provincia Fisiográfica de la Península de Yucatán el potencial de rocas silíceas y carbonatadas reactivas con álcalis es inexistente como se muestra en las Figuras 12 y 13, tomadas de la NMX-C-111-ONNCCE-2004. Por tanto su estudio no fue considerado en esta investigación.

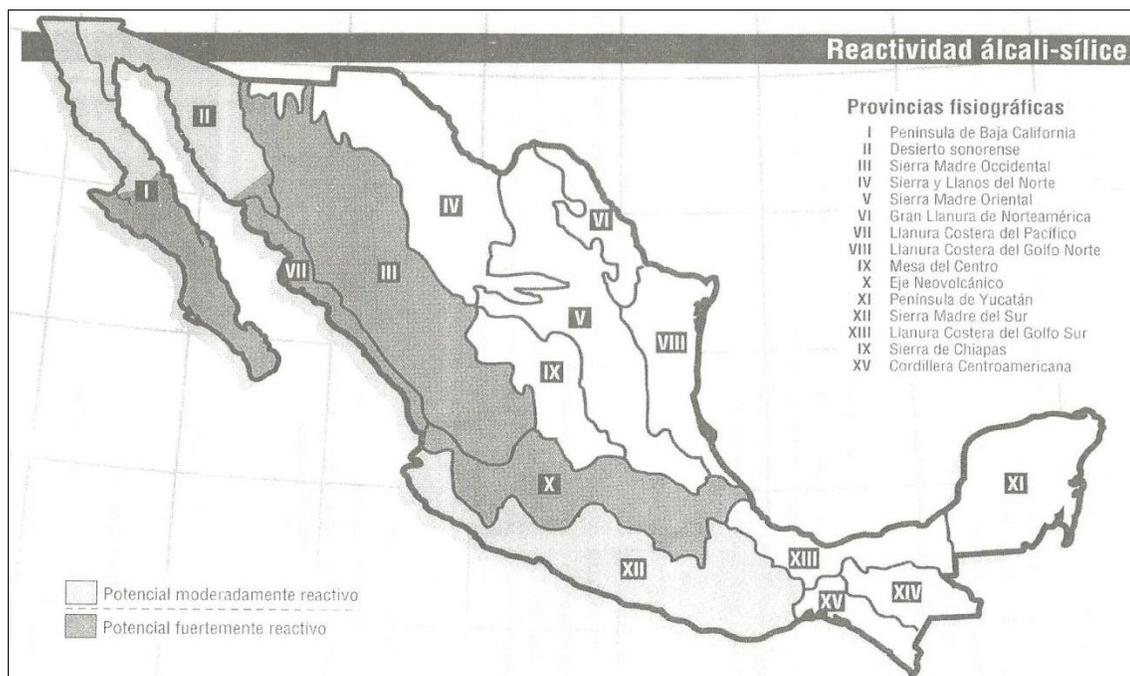


Figura 12. Zonas de reactividad álcali-silíce en México.

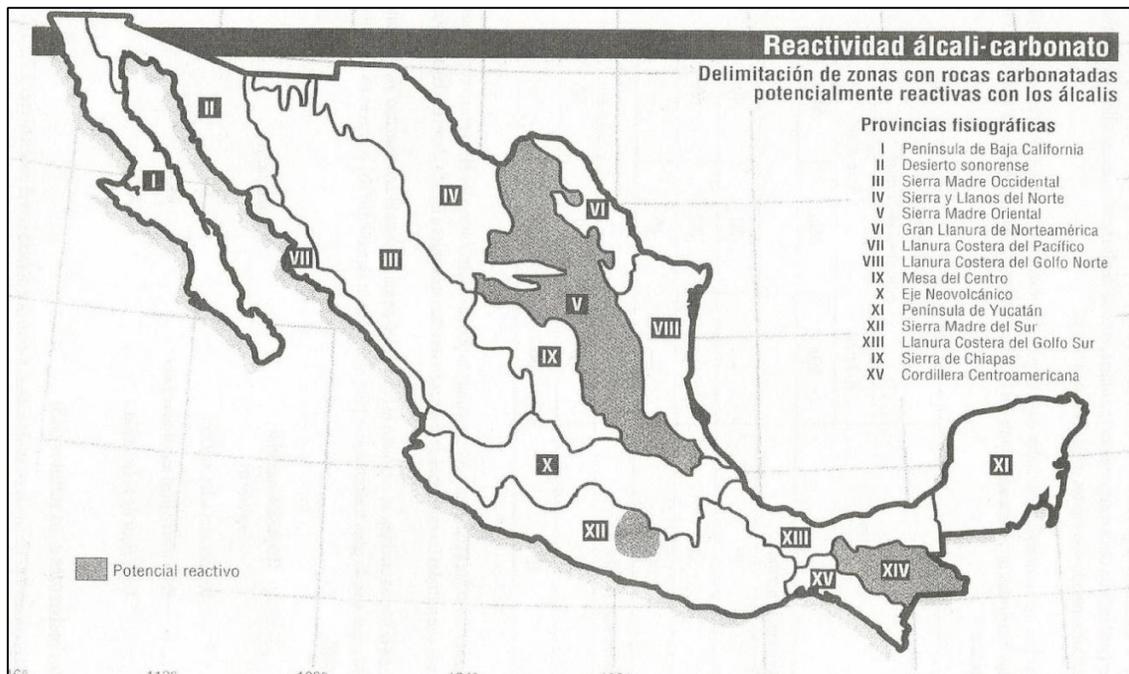


Figura 13. Zonas de reactividad álcali-carbonato en México.

3.9. Trabajos de investigación desarrollados en México

El estudio del comportamiento del concreto fabricado con agregados reciclados, en México, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Martínez y Mendoza, 2006), se ha enfocado al uso de residuos de concreto premezclado. Han tenido cierto avance en cuanto a la caracterización de las propiedades mecánicas, dejando ver que con una granulometría adecuada su comportamiento resulta similar al de un concreto normal clase dos, según el Reglamento de Construcción del Distrito Federal. Sin embargo, el uso generalizado de concreto premezclado aún tiene muchas limitaciones, sin olvidar que la mayor cantidad de residuos proviene de los procesos de construcción y demolición de edificios.

Rolón et al. (2007) experimentaron con residuos de demolición de pavimentos de concreto en Tamaulipas para fabricar agregado grueso. En su procedimiento, procuraron lavar en dos etapas dicho material, con objeto de eliminar impurezas y material fino adherido, a fin de reducir su capacidad de absorción y mejorar sus

propiedades de adherencia. Sin embargo, el comportamiento en estado fresco y endurecido obtenido fue muy limitado, en comparación a un concreto normal, lo cual puede ser atribuido a la mala calidad del concreto de origen.

Por otra parte, Domínguez et al. (2004) compararon las características físicas de los agregados calizos comunes en la región de Quintana Roo, México, con agregados obtenidos por trituración de residuos de construcciones de concreto. Los resultados mostraron disminuciones en la densidad y aumentos en la absorción, factor atribuido al alto contenido de fracción fina, sobre todo aquella que pasa la malla 100 y que alcanzó valores del 20%, similar a lo encontrado en Yucatán por Cerón et al. (1996).

En un trabajo posterior, Domínguez y Martínez (2007) probaron el potencial de reciclaje de dichos agregados construyendo un módulo de vivienda tradicional en Quintana Roo, México, a base de elementos de concreto con materiales reciclados en elementos confinantes, muros, losa y pisos. Las resistencias a la compresión alcanzadas a 28 días fueron de 265 kg/cm² y 300 kg/cm² con relación agua/cemento de 0.7 y 0.6, respectivamente.

3.10. Estudios relacionados con el análisis del ciclo de vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) en la fabricación de concreto, ha sido motivo de estudio por numerosos investigadores en razón del impacto ambiental que genera el proceso de producción de cemento y la extracción de material pétreo para la obtención de agregados (Van den Heede y Belie, 2012), lo cual ha derivado en la búsqueda de materiales sustitutos productos del reciclaje, como ceniza volante, escoria granulada de alto horno, y agregados recuperados de RCD, lo que ha dado lugar al concepto de *concreto verde* (Meyer, 2009).

Una herramienta importante para evaluar los impactos al medio ambiente que generan los procesos de producción y uso del concreto y sus componentes, es la huella de carbono. El concepto de huella de carbono tiene su origen en el de huella ecológica y hasta hace poco representaba el área requerida para asimilar las emisiones de CO₂ durante la vida útil de productos manufacturados por el hombre.

Sin embargo, a medida que el problema del calentamiento global se convirtió en prioritario en la agenda mundial, el concepto y método de la huella de carbono ha cambiado; ya no representa un área, sino las cantidades de CO₂ y gases de efecto invernadero (GEI) asociados a un producto, a lo largo de su ciclo de vida. Se puede entonces definir que la huella de carbono de un producto consiste en el ACV limitado a las emisiones que tienen efecto sobre el cambio climático.

La propiedad a la que frecuentemente se refiere la huella de carbono es el peso en kilogramos o toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero emitida por persona, producto o actividad (Wiedmann y Minx, 2007), para lo cual se requiere llevar a cabo un inventario de emisiones de GEI o ACV siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como ISO 14064, PAS 2050 o GHG Protocolo, entre otras.

Diversos autores en los últimos 5 años han reportado las ventajas que significa el uso de materiales reciclados en la reducción de GEI, expresado como emisiones de CO₂. Por citar algunos, Chui et al. (2008), en Taiwán, evaluaron el análisis de ciclo de vida en la rehabilitación de pavimentos usando materiales reciclados. Encontraron reducciones del 16 al 23%. Chau et al. (2012) hallaron reducciones que van del 6% al 17% en la construcción de edificios de concreto en Hong Kong, utilizando diversos materiales reciclados, como agregados pétreos recuperados, ladrillos y bloques de concreto, plásticos, asfaltos, aceros galvanizados, entre otros. En Australia, Turner y Collins (2013) determinaron una reducción del 9%. Su trabajo involucró concretos fabricados con CPO y geo-polímeros.

A pesar de estas evidencias, se debe tener mucho cuidado en el desarrollo de este tipo de estudios, pues pequeñas variaciones en la definición de metas y objetivos, obtención de inventarios y análisis de impactos, puede ocasionar diferencias importantes en la calificación ambiental, obtenida durante la fase de interpretación de los resultados.

3.11. Conclusiones del Estado del Arte

Derivado del análisis del estado del arte se destacan las siguientes conclusiones:

1. Los agregados reciclados son muy heterogéneos en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas como resultado de la calidad de la materia prima de origen, procesos de trituración y cantidad de contaminantes presentes.
2. En comparación a los agregados naturales de cantera, en la producción de agregados reciclados se genera una mayor cantidad de material fino.
3. Los agregados reciclados de concreto presentan cierta cantidad de mortero adherido a su superficie que origina diversos cambios en sus propiedades físicas y mecánicas en comparación con un agregado normal.
4. La densidad de los agregados reciclados es ligeramente menor a la del agregado normal.
5. La textura de los agregados reciclados es por lo general más rugosa que la de los agregados normales.
6. El coeficiente de forma de los agregados reciclados es similar al de los agregados naturales.
7. La absorción de los agregados reciclados es mayor a la de los agregados naturales, lo cual ocasiona diversos problemas en el diseño de mezclas de concreto.
8. Los agregados reciclados tienen una resistencia menor a la abrasión que los agregados naturales.
9. El proporcionamiento de concreto con agregados reciclados se realiza en forma similar a los métodos tradicionales para concreto normal cuidando el aumento en el consumo de agua, cemento y aditivos para conseguir valores apropiados de resistencia y trabajabilidad.
10. El uso de agregado fino de origen reciclado no es recomendable pues afecta la resistencia a la compresión del concreto.
11. Generalmente, la resistencia a la compresión en el concreto con agregados reciclados disminuye respecto a un concreto normal, lo cual depende de la

calidad del concreto de origen, del porcentaje de agregado substituido y del diseño de mezcla empleado.

12. El módulo de elasticidad se ve afectado por la textura y cantidad de mortero adherido de los agregados reciclados y es menor en comparación a un concreto normal, sobre todo cuando se substituyen los agregados en su totalidad.
13. Los valores altos de porosidad, absorción y permeabilidad, esperados en el concreto con agregados reciclados, pueden ser desfavorables en cuanto a su resistencia al ataque de cargas ambientales como CO_2 , penetración de cloruros o ataque por sulfatos; sin embargo, dichos efectos no están lo suficientemente estudiados.
14. El uso de materiales reciclados en la producción de concreto puede reducir las emisiones de GEI, expresada como CO_2 equivalente ($\text{CO}_2\text{-e}$)

Considerando lo antes expuesto, puede decirse que el concreto fabricado con agregados obtenidos mediante procesos de reciclaje de residuos de construcción y demolición ofrece útiles y variadas aplicaciones, pero aún con mucha incertidumbre en cuanto a sus propiedades mecánicas, su respuesta ante cargas ambientales como la penetración de cloruros y CO_2 , y las emisiones a la atmósfera que su proceso productivo puede causar; por ello, es recomendable continuar el estudio de este material experimentando con procesos diferentes de reciclaje, selección efectiva de materia prima, ensayar mezclas de materiales empleando distintos porcentajes de reemplazo, tanto de cemento como de agregados, de tal forma que se pueda mejorar su comportamiento mecánico y durabilidad en un marco sostenible, es decir buscando reducir los impactos potenciales al medio ambiente, a lo largo de su ciclo de vida.

4. Procedimiento experimental

En la Tabla 10 se muestra en forma jerarquizada la interrelación entre los objetivos planteados y el procedimiento experimental para obtenerlos:

Tabla 10. Esquema de objetivos y procedimientos de la investigación

Hipótesis de trabajo	Objetivos específicos	Actividades relevantes
<p>El concreto fabricado con agregado grueso reciclado de alta absorción, en cierto rango de dosificación, es capaz de alcanzar propiedades mecánicas y características de durabilidad similares a un concreto normal de uso estructural, en forma sustentable.</p> <p>La emisión de bióxido de carbono equivalente en la producción de concreto con agregado grueso reciclado es menor en comparación a un concreto con agregados normales.</p>	<p>Determinar la composición de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) proveniente de los sitios de acopio de la materia prima.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificación de vertederos. ▪ Caracterización de RCD. ▪ Obtención de los agregados ▪ Caracterización de los agregados. ▪ Pruebas físicas de los agregados. ▪ Diseño de mezclas de concreto ensayando 5 porcentajes de sustitución. ▪ Pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, en el concreto.
<p>Objetivo General</p> <p>Evaluar el comportamiento de concretos de uso estructural con agregado grueso reciclado de alta absorción desde un enfoque de durabilidad de acuerdo con normas mexicanas e internacionales para concreto normal, en un marco de sustentabilidad.</p>	<p>Evaluar el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto con agregado grueso reciclado en comparación con un concreto normal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pruebas de porosidad, absorción capilar y permeabilidad al aire ▪ Exposición de especímenes en ambiente severo simulado ▪ Pruebas de carbonatación y penetración de cloruros ▪ Obtención de inventarios de GEI y consumos de energía ▪ Cálculo de la emisión de CO₂-e
<p>Preguntas de investigación</p> <p>¿Cuál es la mezcla optimizada de materiales que permite lograr condiciones de durabilidad en un concreto con agregados gruesos reciclados de alta absorción?</p> <p>¿Cuál es la diferencia en cuanto a propiedades mecánicas y características de durabilidad entre un concreto con agregados reciclados de alta absorción en comparación con un concreto con agregados normales?</p> <p>¿Cuál es la huella de carbono de los concretos con agregados gruesos reciclados en comparación a un concreto con agregados normales?</p>	<p>Establecer los límites de reemplazo de agregados gruesos normales de cantera, por agregados reciclados provenientes de residuos de concreto, con objeto de minimizar los efectos negativos de este material reciclado en las propiedades del concreto a producir.</p> <p>Evaluar la huella de carbono en los concretos producidos como una medida de su sustentabilidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pruebas de porosidad, absorción capilar y permeabilidad al aire ▪ Exposición de especímenes en ambiente severo simulado ▪ Pruebas de carbonatación y penetración de cloruros ▪ Obtención de inventarios de GEI y consumos de energía ▪ Cálculo de la emisión de CO₂-e

El procedimiento experimental se llevó a cabo como se indica en la Figura 14.

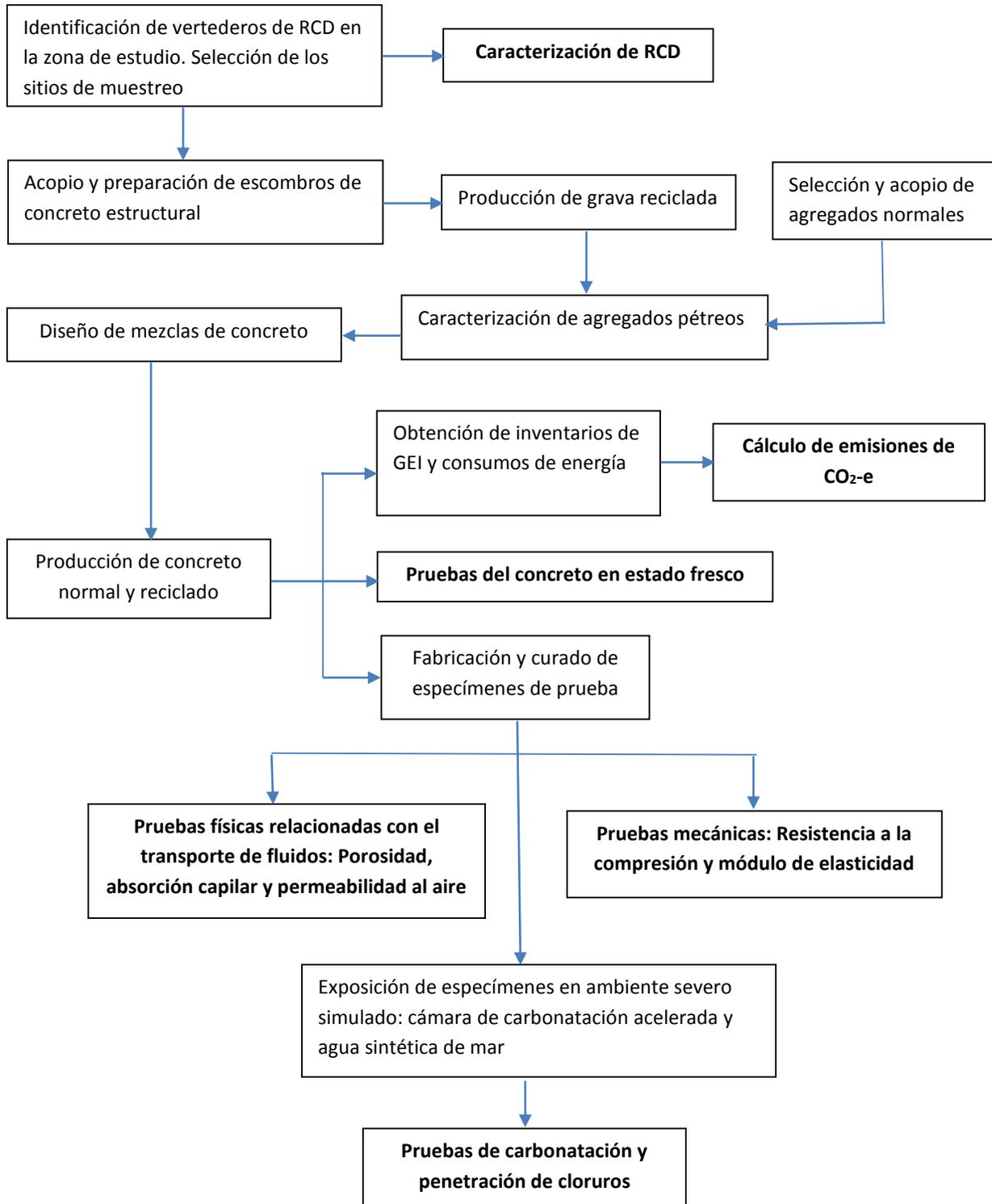


Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento experimental

4.1. Identificación y caracterización de vertederos de RCD

La selección fue determinada de acuerdo con la ubicación y aceptación de los propietarios de los predios donde se encuentren los residuos. La caracterización consistió en clasificar los tipos de RCD encontrados y cuantificarlos de acuerdo con su volumen. Se hicieron recorridos en la ciudad para ubicar sitios de acopio de RCD, seleccionando un área de vertederos a cielo abierto al norte de la ciudad de Mérida, Yucatán, sobre la lateral del anillo periférico, a la altura del km 34 (Figura 15), en razón de lo siguiente:

- Autorización por parte de los propietarios.
- Existencia suficiente de residuos de concreto estructural para hacer un muestreo aleatorio.
- Cercanía al laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), donde se llevó a cabo el programa experimental, de modo que se pudo reducir el tiempo y los costos de traslado del material.



Figura 15. Imagen satelital de vertederos de RCD (adaptada de Google Earth)

De acuerdo con la literatura revisada (Domínguez, 2008; Angulo et al., 2003) la caracterización puede realizarse ya sea por peso, volumen, superficie o en forma visual. En este caso, dada la conformación de los montículos de material se decidió hacerlo por volumen, para lo cual previamente se identificó la ubicación de los RCD provenientes de elementos estructurales como losas, columnas, cadenas y castillos. Posteriormente se eligieron en forma aleatoria 10 montículos prismáticos de un total de 30 y se determinaron los volúmenes de residuos existentes. En la Figura 16 se ilustran algunos de los montículos seleccionados para acopio de escombros de concreto.



Figura 16. Montículos de RCD en vertederos

4.2. Obtención de materia prima

Una vez seleccionados los montículos, se procedió a la separación y medición de volúmenes de los materiales encontrados. Después se llevó a cabo el acopio de material pétreo en forma selectiva, consistente en escombros de concreto, cuidando que se encontraran libres de residuos como plásticos, acero, cartón y vidrio, entre otros. El material trasladado a la FIUADY fue colocado en pilas en un área específica.

Una vez obtenida la materia prima de RCD para producir grava reciclada, se desmantelaron armaduras de acero, cables y ductos de material eléctrico; el material fue cepillado para limpiar impurezas como tierra y vegetales (Figura 17).

4.3. Producción de grava reciclada

Una parte del material extraído del vertedero fue cortado con marro y cincel en porciones de 4" (Figura 18) para ser procesado en una trituradora portátil de mandíbulas con objeto de conocer algunas características del material que se podía obtener a manera de prueba piloto (Figura 19).



Figura 17. Muestra de materia prima obtenida

Figura 18. Muestra preparada para trituración



Figura 19. Trituradora portátil de mandíbulas de 4"

En esta etapa se trituraron 80.57 kg de material. El estudio granulométrico mostró un comportamiento semejante al material natural encontrado en la zona poniente de Mérida, Yucatán (Cerón et al., 1996), defectuoso por el contenido de finos. Asimismo, se realizó una prueba de desgaste que tuvo como resultado 32%, similar a resultados hallados en una investigación previa con agregado reciclado realizada en la FIUADY (Jiménez et al., 2013).

Todo el material restante fue trasladado a una planta industrial de la localidad equipada con trituradora de molino de impactos, siendo procesado para la producción de la grava reciclada (Figura 20).



Figura 20. Trituradora de molino de impactos de la localidad

La grava obtenida mostró forma alargada, superficie rugosa y color desigual debido al mortero adherido a su superficie, tal y como se aprecia en las Figuras 21a y 21b donde se compara con la grava normal que fue utilizada en la fabricación de las mezclas de concreto. En la Figura 21c puede apreciarse el agregado fino de banco seleccionado para las pruebas.



Figura 21a. Grava reciclada. Figura 21b. Grava normal Figura 21c. Agregado fino

4.4. Caracterización de los agregados

Una vez obtenidos los agregados normales y reciclados, el siguiente paso fue su caracterización física. En primer término el agregado grueso (grava), consistente en la determinación de su peso volumétrico seco y suelto, peso volumétrico seco compacto, densidad, absorción y coeficiente de abrasión. La caracterización del agregado fino incluyó la determinación del peso volumétrico seco y suelto, densidad, absorción y módulo de finura.

4.5. Proporcionamiento de mezclas de concreto

Se tomó como base el método de factores empíricos del ACI, determinando en primer lugar el agua de mezcla de acuerdo con el revenimiento y el tamaño máximo del agregado, la cantidad de cemento, grava y, finalmente, por diferencia de volumen, la arena. Se privilegió este procedimiento en lugar de algún otro método, como el de contenido mínimo de vacíos, en razón de que éste suele manifestar reducida trabajabilidad por exceso de mortero, además de requerir un control estricto en cuanto a forma y tamaño de los agregados.

Los materiales utilizados fueron: agregado grueso (grava) normal y reciclado, agregado fino de banco (arena), agua y cemento portland compuesto, con variaciones de la relación agua/cemento y distintos porcentajes de reemplazo de agregado normal. De acuerdo con la literatura revisada, se realizaron los ensayos fijando 2 valores de la relación agua/cemento: 0.5 para alcanzar requisitos mínimos de durabilidad y 0.7 con objeto de lograr resistencias para uso estructural en concretos comunes en la región de estudio, así como 5 tasas de reemplazo (%R)

de agregado grueso: 100%, 75%, 50%, 25% y 0%. El uso de aditivos súper plastificantes no fue considerado en virtud de que no se han experimentado problemas de trabajabilidad en las mezclas con el tipo de material de la zona para las relaciones a/c seleccionadas.

4.6. Fabricación de especímenes de prueba

Se utilizó mezcladora de tambor rotatorio de motor eléctrico con capacidad de un saco de cemento. Para la fabricación de cada lote o familia de concreto se hicieron amasadas de 120 litros. El ciclo de operación de cada amasada o *colado* fue de 9 minutos. El primer minuto para permitir absorción de humedad por parte de la grava, 3 minutos de mezclado después de adicionar el resto de los materiales (arena, cemento y agua), tres minutos de reposo y finalmente 2 minutos de mezclado previo al proceso de vaciado y acomodo en los moldes. Por cada colado se utilizaron moldes cilíndricos estándar de 15 x 30 cm para pruebas mecánicas. Para pruebas de vacíos se fabricaron cilindros de 10 x 20 cm, para ensayos de carbonatación se elaboraron moldes cilíndricos de 7.5 x 15 cm y para pruebas de permeabilidad y cloruros, prismas de 15 x 15 x 60 cm (Figura 22).



Figura 22. Cilindros de prueba

4.7. Pruebas de los concretos en estado fresco y endurecido

Las pruebas de los concretos en estado fresco y endurecido se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos normales de estudio en concretos normales:

4.7.1. Prueba de revenimiento

Se efectuó para detectar variaciones en la consistencia y trabajabilidad de las mezclas siguiendo el procedimiento de la Norma ASTM C 143 (Figura 23).

4.7.2. Contenido de aire atrapado

Esta prueba se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 231-09 utilizando el medidor tipo A (Figura 24).



Figura 23. Prueba de revenimiento



Figura 24. Medidor de aire atrapado tipo A

4.7.3. Vacíos en los especímenes de prueba

Se determinó midiendo la porosidad total, densidad y absorción mediante el procedimiento de la norma ASTM C 642-06. El valor de la porosidad del concreto aporta indicaciones sobre la calidad del mismo y puede ser un índice indirecto de su permeabilidad. En este caso, los parámetros fueron obtenidos de igual forma en el laboratorio a partir de la masa seca al horno a 105 °C, masa sumergida de las probetas de 10 x 20 cm, y masa saturada antes y después de hervir.

Los cálculos se efectuaron con las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\text{Porosidad total} = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{B - D} \quad (2)$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (3)$$

Dónde:

A, peso seco al horno

B, peso saturado

C, peso saturado, después de hervir

D, peso sumergido

4.7.4. Resistencia a la compresión

Efectuada en forma tradicional de acuerdo con las normas ASTM C 39 y ASTM C 192, después de 28 días de curado (Figura 25). La resistencia a la compresión (f_c) fue obtenida dividiendo la carga de ruptura por el área de la sección transversal de cada cilindro de prueba.

4.7.5. Módulo de elasticidad estático

Equivalente al módulo de Young ($E = \sigma/\varepsilon$). Se realizó siguiendo el procedimiento de prueba especificado por la norma ASTM C 469 (Figura 26). El módulo de elasticidad (E_c) es uno de los principales parámetros utilizados para el diseño de estructuras de concreto. En esta investigación fue determinado a partir de la ecuación 4:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.005\%} \quad (4)$$

Dónde σ_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, σ_1 es el esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de 0.005%, y ε_2 corresponde a la deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 .



Figura 25. Prueba de resistencia a la compresión



Figura 26. Prueba de módulo de elasticidad

4.8. Pruebas de durabilidad

Se efectuaron pruebas de transporte de fluidos en el concreto, tales como absorción capilar y permeabilidad al aire; así como pruebas que proporcionan valores directos de durabilidad, siendo éstas, resistencia a la carbonatación y penetración de cloruros.

4.8.1. Absorción capilar

Para los ensayos de absorción capilar se cortaron dos rodajas de 10 cm de diámetro por 5 cm de espesor de las probetas cilíndricas de 10 x 15 cm, por cada una de las mezclas. La cara superior de las rodajas fue cubierta con una membrana de nylon sujeta con una liga. En las caras laterales se aplicó una capa de pintura epoxica. La cara de exposición se dejó sin ningún tipo de recubrimiento para permitir el ingreso del agua por succión capilar en una sola dirección, al ser parcialmente sumergidas en agua durante un lapso de 8 días.

Las probetas fueron asentadas individualmente sobre bases de PVC ranurado para no interferir el contacto con el agua (Figura 27).



Figura 27. Prueba de absorción capilar

4.8.2. Permeabilidad al aire

Los ensayos de Permeabilidad al aire se llevaron a cabo utilizando el Método Torrent (Torrent y Frenzer, 1995), incluido en la Norma Suiza SIA 262/1-E: 2003. Se probaron 3 vigas de 15x15x60 cm por cada tipo de concreto a una edad de 90 días (Figura 28).



Figura 28. Prueba de permeabilidad al aire en vigas

4.8.3. Carbonatación acelerada

Una de las principales causas de deterioro del concreto estructural se debe a la reacción entre los productos de hidratación de la pasta de cemento y el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera, lo cual reduce los valores de pH dando lugar a la corrosión de las barras de acero de refuerzo y consecuentemente a la formación de grietas lo que al final deriva en la reducción de la vida de servicio de la estructura. Como este proceso puede ser muy lento, se optó por emplear una cámara de aceleración con ambiente interno controlado, para incrementar la concentración natural de CO_2 y mantener constante la humedad relativa. El programa experimental se detalla a continuación:

Por cada una de las 10 mezclas de concreto, se dispuso de 5 probetas cilíndricas de 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura. Todas las probetas fueron fabricadas siguiendo la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 y sometidas a un proceso de curado húmedo por inmersión durante 28 días. Posterior a ese periodo se dejaron secar al ambiente natural del laboratorio durante 6 meses. Asimismo fueron cubiertas con una capa de pintura epóxica en las caras superior e inferior para inducir un flujo radial al ser sometidas a la acción de los gases en el interior de la cámara de aceleración.

Se empleó un cámara prismática rectangular de 1.20 m x 0.32 m x 0.45 m, fabricada con placas de vidrio en la base y paredes, y tapa de acrílico de 1 cm de espesor. La cámara fue montada en un soporte metálico, como se aprecia en la Figura 29.

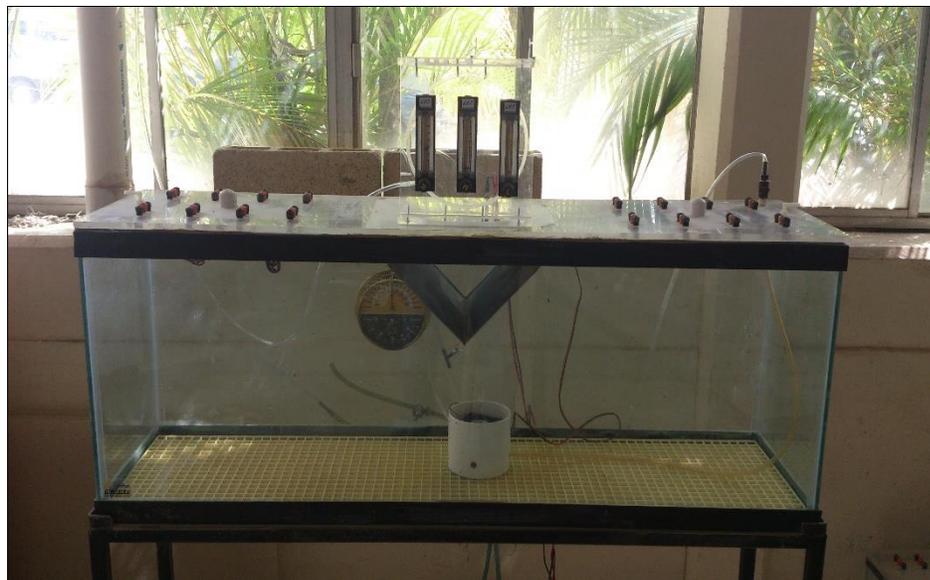


Figura 29. Cámara de carbonatación acelerada

Para lograr una distribución eficiente del flujo de aire dentro de la cámara, se colocó un ventilador en la parte media de la base y un deflector metálico justo en la parte superior de éste. Para obtener la concentración deseada de CO₂ (4%) y humedad relativa (65%) se mezcló el flujo de CO₂ comercial puro, con aire seco proveniente de un compresor y aire húmedo obtenido del mismo compresor haciéndolo pasar

por una torre humidificadora cilíndrica de 80 cm de altura y 4" de diámetro fabricada con tubería de PVC y equipada con un filtro burbujeador sumergido en cierta cantidad de agua (1/3 de la altura). El flujo de los gases se controló con 3 medidores de flotador debidamente calibrados. Asimismo, en el interior de la cámara fue instalado un termo higrometro de condensación para medir la humedad relativa y eventualmente la temperatura. El diagrama de instalación de la cámara y aditamentos se presenta en la Figura 30.

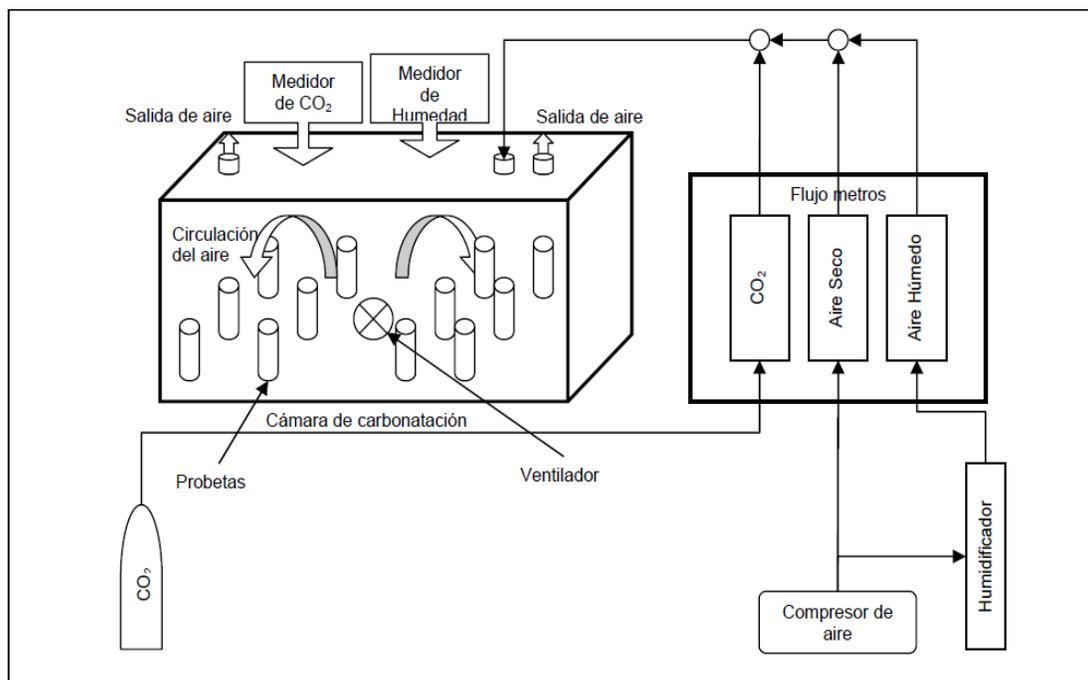
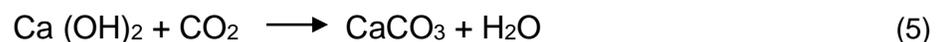


Figura 30. Diagrama de instalación de la cámara de aceleración (Cob, 2004).

4.8.3.1. Cálculo de flujo de CO_2

El cálculo de flujo de CO_2 parte de la ecuación 5, que expresa la reacción entre el compuesto $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio) el cual es un producto de hidratación de la pasta de cemento y CO_2 (dióxido de carbono) para producir CaCO_3 (carbonato de calcio) y agua (H_2O):



Para conocer la cantidad necesaria de CO₂, se determinó el volumen de concreto a ensayar y la cantidad de cemento contenida en ese volumen considerando que en un análisis de óxidos, el hidróxido de calcio representa aproximadamente el 65% de la cantidad de cemento por mezcla.

Se tomó como base un volumen nominal de 0.000663 m³ por espécimen de prueba. La cantidad de cemento en peso por espécimen que corresponde al hidróxido de calcio fue de 0.177 kg para las mezclas con 0.5 a/c y de 0.126 kg para las mezclas con 0.7 a/c.

Seguidamente se efectuó un balance molecular de los compuestos en dicha reacción (Tabla 11).

Tabla 11. Balance molecular para cálculo de CO₂

Compuesto	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃	H ₂ O
Peso molecular	74	44	100	18

La cantidad de CO₂ en peso, requerida por día, se obtuvo relacionando los pesos moleculares de ambos compuestos (dióxido de carbono e hidróxido de calcio) multiplicando el resultado por el peso de cemento calculado. Finalmente, el volumen de CO₂ por día se determinó aplicando la Ley de los gases ideales (ecuación 6).

$$PV = \eta RT \quad (6)$$

Dónde:

P, presión interna en el sistema (se considera 1.033 kg/cm² equivalente a 1 atm).

V, volumen equivalente de CO₂, en litros (L)

η , cantidad de CO₂, en moles

R, constante universal de los gases ideales, equivalente a 0.08205746 (atm x L)/(mol x K)

T, temperatura absoluta en K (se considera 30° C equivalente a 303 K).

A fin de mantener una concentración constante de CO₂ al 4% en el interior de la cámara, fue necesario calcular una cantidad adicional de dicho fluido; 4.167 moles equivalente a 71.95 mL/min. Como la cámara utilizada es de flujo continuo, esta concentración fue monitoreada diariamente con un medidor digital.

La cantidad de aire húmedo fue la requerida para mantener la humedad relativa en 65% aproximadamente, para lo cual fue necesario completar el nivel de agua dentro de la torre humidificadora, una vez por semana.

Las cantidades teóricas del flujo (mL/min) en el interior de la cámara, para la primera semana de prueba, se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Flujo de CO₂ y aire en el interior de la cámara

Gases	1	2	3	4	5	6	7
CO ₂ para 0.5 a/c	74.63	29.40	22.00	18.18	15.73	13.99	12.68
CO ₂ para 0.7 a/c	82.79	31.51	23.11	18.76	15.97	14.00	12.50
CO ₂ adicional	71.95	71.95	71.95	71.95	71.95	71.95	71.95
Total	230.37	134.86	120.06	112.88	108.65	105.94	104.13
Escala en el flujómetro	68	45	42	40	38	37	36
Aire	5759	3371	3001	2822	2716	2649	2603
Escala en el flujómetro	56	28	25	23	22	21	20

En cada ensaye, se utilizó un par de probetas por cada tipo de concreto. El periodo total de exposición en la cámara de aceleración fue de 56 días para los concretos con 0.7 a/c. Las probetas fueron retiradas temporalmente de la cámara para determinar los frentes de carbonatación a los 14, 35 y 56 días de prueba. Por su parte, los concretos con 0.5 a/c necesitaron 70 días de exposición, siendo extraídas las probetas a los 14, 35 y 70 días de prueba. Como especímenes de control, otro grupo de probetas fue mantenido en el exterior de la cámara, al ambiente de laboratorio, con una concentración promedio de 0.05% de CO₂, determinada con un sensor digital de gases. Las probetas fueron devueltas a la cámara de carbonatación una vez que la rodaja de muestra fue cortada con cincel y martillo. La profundidad de los frentes de carbonatación fue determinada con vernier

milimétrico en las muestras recién cortadas, después de aplicar un indicador ácido-base (fenolftaleína al 1%), siguiendo las recomendaciones de la RILEM (1988). En las Figuras 31 y 32 puede apreciarse a manera de ejemplo el avance de los frentes de carbonatación en concretos con 50%R en 3 momentos diferentes de la prueba (inicio, mitad y final).



Figura 31. Avance de los frentes de carbonatación en concretos con 0.5 a/c



Figura 32. Avance de los frentes de carbonatación en concretos con 0.7 a/c

Debido a que se emplearon probetas cilíndricas, fue necesario hacer un ajuste de las mediciones de las profundidades de carbonatación, como si se tratara de una superficie plana infinita, siguiendo el procedimiento sugerido por Moreno (1999).

4.8.4. Penetración de cloruros

El ion cloruro (Cl^-) es uno de los principales agentes ambientales capaz de provocar un proceso de corrosión en las armaduras de acero embebidas en los elementos de concreto y por ende reducir su durabilidad.

La metodología específica para determinar el comportamiento de las muestras de concreto reciclado ante la acción acelerada de cloruros provenientes de un ambiente marino simulado, se detalla a continuación:

4.8.4.1. Fabricación y acondicionamiento de especímenes de prueba

Por cada tipo de concreto diseñado, se dispuso de 2 probetas prismáticas de 15x15x60 cm para las pruebas principales de penetración de cloruros, así como 2 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura para determinar la concentración base de cloruros.

Todas las probetas fueron fabricadas siguiendo la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 y sometidas a un proceso de curado húmedo por inmersión durante 28 días. Posterior a ese periodo se dejaron secar al ambiente natural del laboratorio durante 3 meses con la finalidad de acondicionarlas para los ensayos subsiguientes.

Las probetas prismáticas fueron cubiertas con una capa de pintura epóxica en las caras superior e inferior, y en 3 de sus caras laterales, a fin de sellarlas para inducir un flujo unidireccional de cloruros al ser sometidas a un proceso de inmersión en agua sintética de mar.

Las probetas cilíndricas fueron cortadas a la mitad de su altura, con segueta mecánica para extraer rodajas de 1 cm de espesor, mismas que a continuación se pulverizaron con marro de goma y mortero de porcelana a fin de obtener polvo que se hizo pasar por el tamiz No. 50 para evitar que influyera el tamaño del grano en la extracción de los cloruros que pudieran estar presentes en el cemento, en los agregados y en el agua utilizada durante el proceso de fabricación del concreto.

4.8.4.2. Preparación del agua sintética de mar

Se preparó agua sintética de mar usando sal marina comercial disuelta en agua desalinizada, similar a lo establecido en la norma ASTM D 1141-98. La proporción empleada fue de 34 g de sal por litro de agua para cumplir con los parámetros precisados en la Tabla 13.

Tabla 13. Composición química del agua sintética de mar

Parámetro	Concentración
Cloruro de sodio (NaCl)	24.53 g/L
Cloruro de magnesio (MgCl ₂)	5.2 g/L
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	1.16 g/L
Sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄)	4.09 g/L
Gravedad específica	1.023 a 1.025
pH	8.2 a 8.4

4.8.4.3. Tratamiento de los especímenes con agua sintética de mar

Las probetas prismáticas acondicionadas fueron sumergidas verticalmente en contenedores de agua sintética de mar (Moreno y Sagües, 1996), hasta el primer tercio de su altura para provocar la penetración de cloruros (Figura 33). El tercio medio de cada uno de los especímenes fue tratado diariamente por aspersión (muestras de salpicadura) con la misma agua sintética en periodos húmedos de 2 horas y periodos secos de 22 horas para simular un efecto de marea (Rejón, 2000). El último tercio del espécimen permaneció seco al ambiente del laboratorio a manera de control. El periodo total del tratamiento en la solución salina fue de 10 semanas para permitir el ingreso de los cloruros hasta un nivel crítico (Maldonado et al., 1999). Los contenedores fueron rellenados con agua cada semana para compensar la pérdida de nivel por evaporación y evitar variaciones en la concentración de sales.



Figura 33. Inmersión de especímenes en agua sintética de mar

4.8.4.4. Obtención de polvos de los especímenes de prueba

Una vez concluido el tratamiento por inmersión y aspersion de las probetas detallado en el apartado anterior, se procedió a la obtención de polvos de concreto efectuando 9 horadaciones con barreno por cada tercio del espécimen en capas de 1 cm hasta completar 6 cm de profundidad utilizando brocas de 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " en forma *telescopiada* para evitar en lo posible la contaminación de los orificios durante el proceso de perforación y la mezcla de los polvos extraídos a diferentes profundidades (Figura 34). Más tarde, el material obtenido fue cribado por el tamiz No. 50 y clasificado para proceder a la determinación de cloruros (Figuras 35 y 36).



Figura 34. Extracción de polvos de concreto



Figura 35. Cribado de polvo de concreto



Figura 36. Clasificación en bolsas de plástico

4.8.4.5. Determinación de la concentración de cloruros totales

La determinación de cloruros totales se efectuó siguiendo el método del Departamento de Transporte del Estado de Florida (FDOT, por sus siglas en inglés) el cual se desarrolla básicamente en las fases siguientes:

- a. Durante la primera fase las muestras de polvo cribado de concreto fueron secadas a 110 °C y enfriadas a temperatura ambiente en un desecador. Posteriormente se obtuvieron muestras duplicadas de 3 g aproximadamente, pesadas en balanza electrónica (Figura 37).
- b. En la segunda fase, se preparó una solución por cada muestra, con 5 mL de agua destilada, 35 mL de ácido nítrico y algunas gotas de indicador de naranja de metilo hasta alcanzar una coloración rosada (Figura 38), la cual fue sometida a un proceso de digestión ácida calentándola hasta hervir para extraer los cloruros totales presentes en el polvo.
- c. El tercer paso, consistió en filtrar al vacío la solución. Lo cual se realizó en un matraz Erlenmeyer empleando una bomba de vacío y papel filtro de 5.5 cm de diámetro y poro de 20 μm colocado en un embudo plano (Figura 39).
- d. En el cuarto paso las muestras filtradas fueron aforadas con agua destilada hasta completar 100 mL (Figura 40).



Figura 37. Pesado de muestra

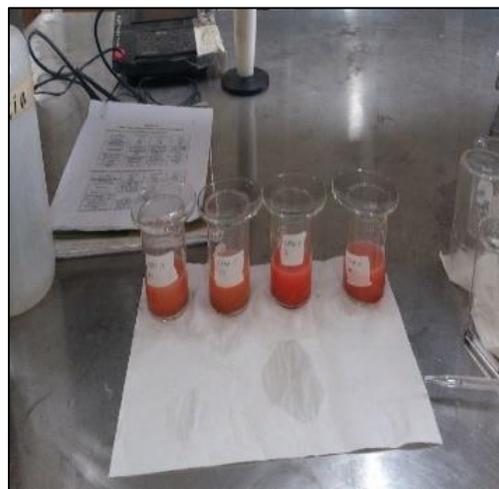


Figura 38. Digestión de muestras



Figura 39. Filtración al vacío

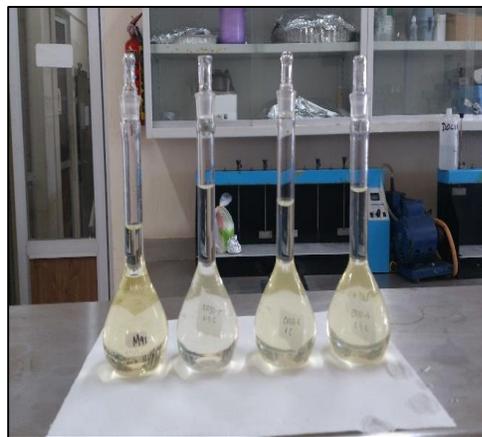


Figura 40. Muestras aforadas

- e. El quinto paso correspondió a un proceso de titulación con nitrato de plata (AgNO_3) colocando las muestras en un agitador magnético. Los potenciales electroquímicos (en mV) se leyeron en un voltímetro al introducir electrodos selectivos de cloruro en las muestras en agitación (Figura 40). Primero, se procedió con una muestra preparada solamente con agua destilada y nitrato de potasio (KNO_3), denominada “Blanco” que sirvió para determinar el potencial de escalamiento. Después se titularon las muestras aforadas con adiciones sucesivas de 0.5 mL de AgNO_3 hasta alcanzar el potencial antes obtenido, y cuatro adiciones posteriores para obtener una recta lo más definida posible.



Figura 41. Medición de potenciales electroquímicos

- f. En el sexto y último paso, se obtuvieron los puntos de intersección de las rectas definidas por los potenciales eléctricos (mV) y la cantidad de AgNO_3 (mL) con el eje de las abscisas de una Gráfica de Gran (Figura 42), utilizando hoja de cálculo Excel® similar al procedimiento sugerido por Zellmer (1997).

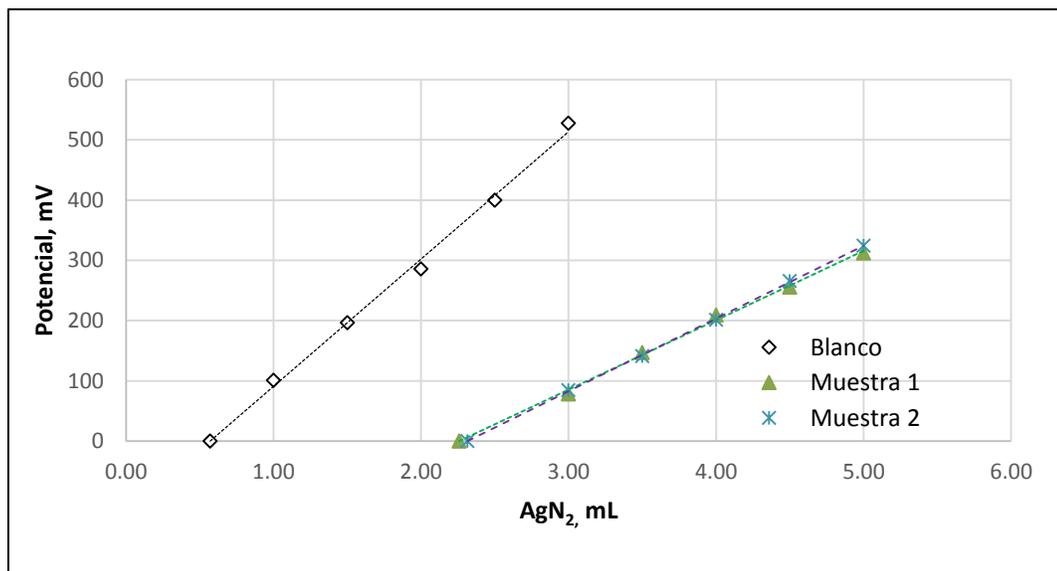


Figura 42. Gráfica de Gran para intersecciones electroquímicas

Se ha privilegiado este método por encima de otros disponibles, en virtud de su facilidad de aplicación y confiabilidad en los resultados obtenidos en investigaciones anteriores en la FIUADY (Cua, 2010).

4.9. Evaluación de la huella de carbono

Como una medida de su sustentabilidad, se evaluó la huella de carbono en los concretos normales y reciclados fabricados durante el procedimiento experimental. El concepto de huella de carbono implica el estudio de Gases de Efecto Invernadero (GEI) emitidos por emanaciones directas o indirectas durante todo el proceso de fabricación, incluyendo el acopio de materiales. Estos gases son: Bióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O), los cuales impactan en el calentamiento global del planeta.

Dicho impacto ambiental fue medido a partir de datos obtenidos en campo, así como distintos inventarios de emisiones de GEI siguiendo una normativa internacional reconocida, como la ISO 14064-1, de tal modo que fue posible conocer la masa de CO₂ equivalente (CO₂-e) originada por el proceso de fabricación de los concretos. El estudio fue dividido en 4 fases (Figura 43).

1. Definición de objetivos y alcance del estudio. Incluye tanto la definición exacta del sistema a estudiar, como el alcance y la profundidad del estudio.
2. Análisis de inventario. Acopio de datos para cuantificar las entradas y salidas de materia y energía del sistema de estudio definido en la fase anterior. Se debe llegar hasta los flujos elementales, es decir, las entradas y salidas directas al medio natural.
3. Evaluación de impacto. Identificación, caracterización y cuantificación de los efectos sobre el medio ambiente del sistema estudiado.
4. Interpretación de los resultados: Se identifican los puntos significativos basados en los resultados obtenidos en la fase anterior, verificando su integridad, sensibilidad y coherencia. Además se añaden las conclusiones del estudio así como sus limitaciones y recomendaciones.

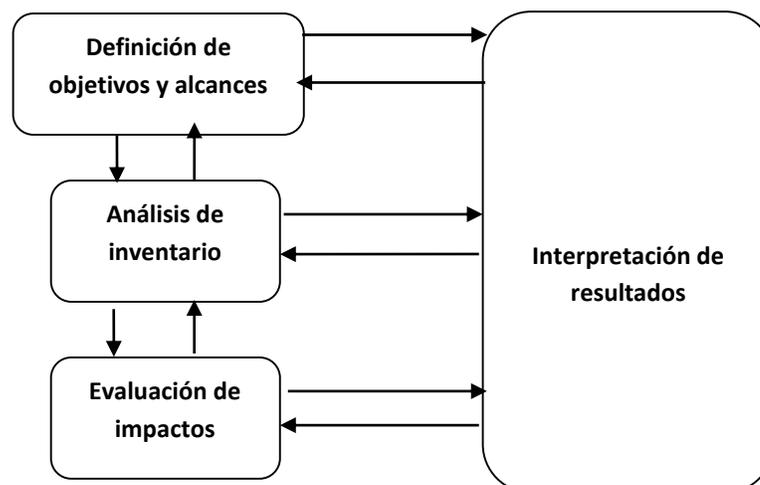


Figura 43. Marco de referencia para la evaluación de huella de carbono

4.9.1. Definición de alcances y límites del sistema

El primer paso de estudio ha consistido en la definición de los alcances y límites del sistema. El análisis fue enfocado en la producción de agregados para la fabricación de concreto. Como se especificó al inicio de este capítulo, se utilizaron dos tipos de agregado grueso y agregado fino característico de la localidad.

- Agregado normal, proveniente de la trituración de piedra caliza virgen.
- Agregado reciclado, proveniente de la trituración de escombros de concreto estructural.
- Agregado fino de banco seleccionado, proveniente de la trituración de piedra caliza virgen.

El cemento fue el mismo para todas las mezclas de concreto y su proceso productivo se considera en forma independiente del resto de los materiales.

Los sitios de análisis fueron los siguientes:

- Planta trituradora local donde se produjo el agregado grueso reciclado.
- Planta trituradora local donde se produjeron los agregados gruesos y finos normales.
- Vertederos de RCD donde se seleccionaron los escombros de concreto para reciclar.

En la Figura 44 se presenta el sistema de emisiones de CO₂ para la producción de 1 m³ de concreto normal y con agregados reciclados. La materia prima se refiere a piedra caliza y agua. La diferencia entre ambos tipos de concreto estriba en que para producir concreto con agregados reciclados se utiliza además escombros de concreto extraídos de RCD.

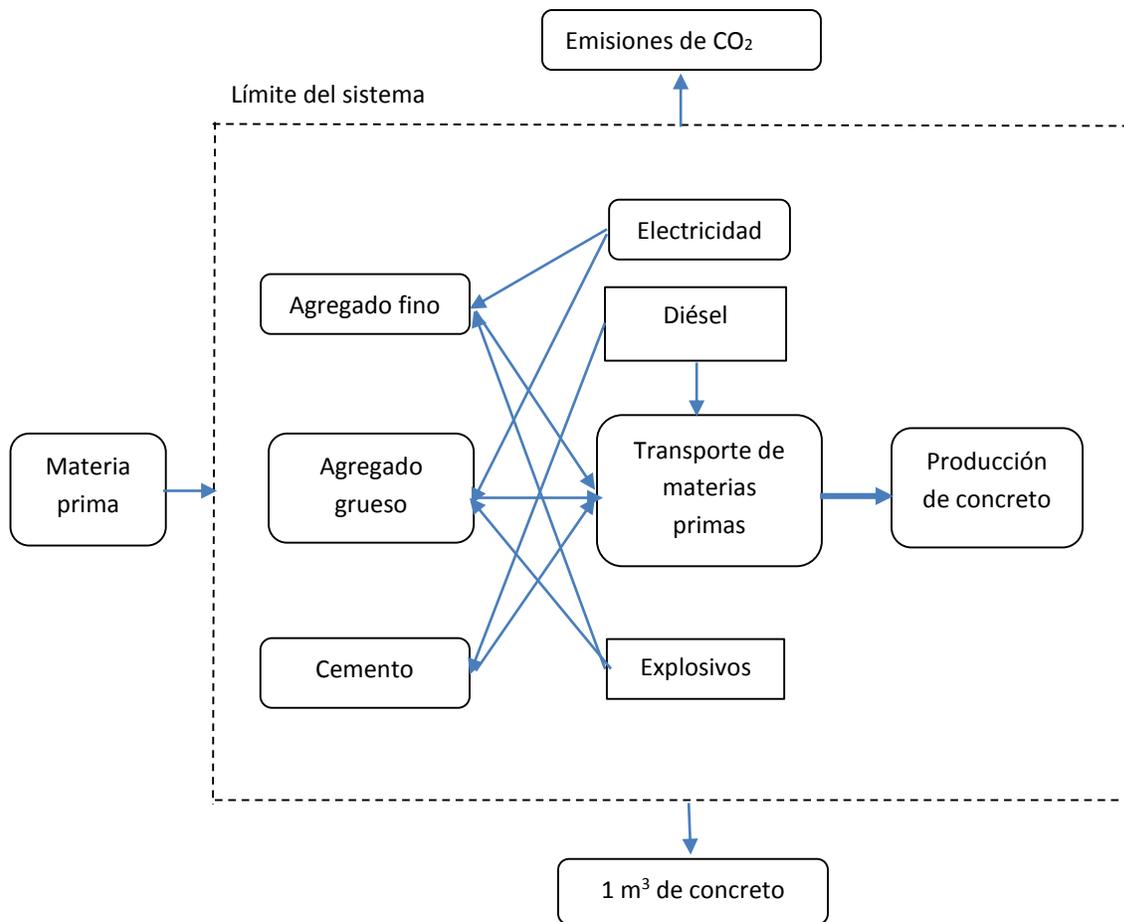


Figura 44. Sistema de emisiones de CO₂ en la producción de concreto

4.9.2. Inventario del sistema

Esta fase involucró la recolección de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema. La obtención de datos fue clasificada en dos niveles, que a continuación se mencionan:

Nivel 1. Consumos de energía y de recursos obtenidos de bitácoras de operación de las plantas de procesamiento.

Se refiere a los rendimientos y consumos de recursos en el momento de realización de las actividades. Son típicamente derivadas del uso de un combustible fósil (diésel) para el transporte de las materias primas. En este caso, se refiere al consumo de los vehículos para transporte de los materiales, así como a los volúmenes de explotación de piedra caliza, uso de explosivos y agua que a su vez generan emisiones de CO₂-e.

Nivel 2. Factores de emisión de CO₂-e para la producción de materiales.

Son inducidos por la actividad objeto de análisis, no emitidas en el lugar donde se realizó la actividad, ya que se derivaron de fuentes no controladas directamente. En este caso, son las asociadas a la producción de cemento y a las emisiones por el uso de energía y materiales para la fabricación del concreto. Fueron tomados de distintas bases de datos, señaladas en la Tabla 14.

En dicha tabla se registra que de acuerdo con cifras de la Cámara Nacional de Cemento en México, la emisión promedio por producción de cemento Portland es de 745 kg CO₂-e/ton (INE, 2004), desestimando el valor de 612 kg CO₂-e/ton informado por CEMEX (2013), la principal cementera del país. Lo anterior, en razón de que no indican cual fue la metodología para determinarlo y, que discrepa notoriamente de lo reportado en otros países con mayor grado de industrialización y avance tecnológico, donde la emisión estimada fluctúa entre 800 y 850 kg de CO₂-e/ton de cemento, como en Alemania (Öko-Institute, 2013), Holanda (Van den Heede y Belie, 2012), Dinamarca (Damtoft et al., 2008) y otros países de la Unión Europea (Josa, et al., 2004).

Tabla 14. Inventario del sistema de emisiones de CO₂-e, energía y materiales

Materiales	Factor	Unidad	Referencia
Cemento	0.745	kg CO ₂ -e/kg	INE, 2004
Explosivos			
Rendimiento:	0.465	kg de producto/m ³	APC, 1987
Emisión:	0.440	kg CO ₂ -e/kg	Turner y Collins, 2013
Diesel			
Rendimiento:	3.000	km/L	TRICASU, 2014
Emisión:	2.680	kg CO ₂ -e/L	Turner y Collins, 2013
Grava			
Rendimientos:			
Normal	1.320	m ³ piedra/1000 kg	TRICASU, 2014
Reciclada	0.002	m ³ escombros/kg	TRICASU, 2014
Emisión:	0.041	kg CO ₂ -e/kg	Turner y Collins, 2013
Arena			
Rendimiento:	1.120	m ³ piedra/1000 kg	TRICASU, 2014
Emisión:	0.014	kg CO ₂ -e/kg	Turner y Collins, 2013
Electricidad	1.350	kg CO ₂ -e/KWH	Turner y Collins, 2013
Agua potable	0.540	KWH/m ³	CONUEE, 2011
Concreto			
Colado y colocación	0.012	kg CO ₂ -e/kg	Turner y Collins, 2013

La cantidad total de emisiones de CO₂-e/m³ de concreto correspondió a la suma de emisiones por producción de cemento, agregados, agua, colado y colocación del concreto; elementos que a su vez requirieron del uso de materia prima como piedra caliza y agua, así como del consumo de electricidad, combustible (diésel) y explosivos. Estos últimos se refieren a la mezcla de agentes de baja densidad como *Tovex* y *Mexamón*, y complementos como fulminantes y mecha, utilizados en trabajos de voladura.

5. Resultados y Discusión

Concluido el procedimiento experimental, se presentan los resultados que han permitido la consecución de los objetivos particulares de la investigación.

5.1. Caracterización de vertedero de RCD

En primer lugar se llevó a cabo la caracterización de los RCD. Inicialmente se cuantificaron los materiales de cada montículo como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Volúmenes de RCD, m³

<i>Montículo</i>	<i>Forma</i>	<i>Concreto</i>	<i>Mampostería</i>	<i>Cerámica</i>	<i>Plástico</i>	<i>Madera</i>	<i>Otros</i>	<i>Total</i>
001	Rectangular	16.8	8.4	3.4	1.7	2.7	0.6	33.6
002	Rectangular	11.6	7.3	3.2	4.1	0.8	--	27.0
003	Cónica	7.3	4.8	4.2	1.9	0.8	0.2	19.2
004	Rectangular	14.6	5.2	6.5	4.5	1.0	0.7	32.5
005	Cuadrada	14.4	14.4	3.2	--	--	--	32.0
006	Cónica	9.8	6.7	6.7	2.7	0.8	--	26.7
007	Rectangular	21.0	10.5	1.8	0.7	0.7	0.3	35.0
008	Rectangular	12.2	13.4	6.4	--	--	--	32.0
009	Rectangular	10.5	10.5	4.5	2.4	1.5	0.6	30.0
010	Rectangular	7.5	10.0	2.5	2.5	1.5	1.0	25.0

En total se midieron 125.7 m³ de RCD de concreto, de los cuales se extrajo el 4% con lo que se pudo recuperar aproximadamente 2 m³ de grava, suficientes para el programa experimental de la investigación.

Cabe aclarar que los residuos de concreto se refieren a elementos estructurales, los de mampostería a residuos de bloques, bovedillas, tabiques y piedra, los de cerámica a pisos y acabados, los de plástico a tuberías de PVC, ductos de instalación eléctrica y accesorios, los de madera a restos de cimbras y andamios, y

otros a residuos de cartón, ramas, postes, cubetas, bolsas de materiales y diversos. Posteriormente se determinó en forma porcentual la composición de RCD, lo cual puede verse en la Figura 45.

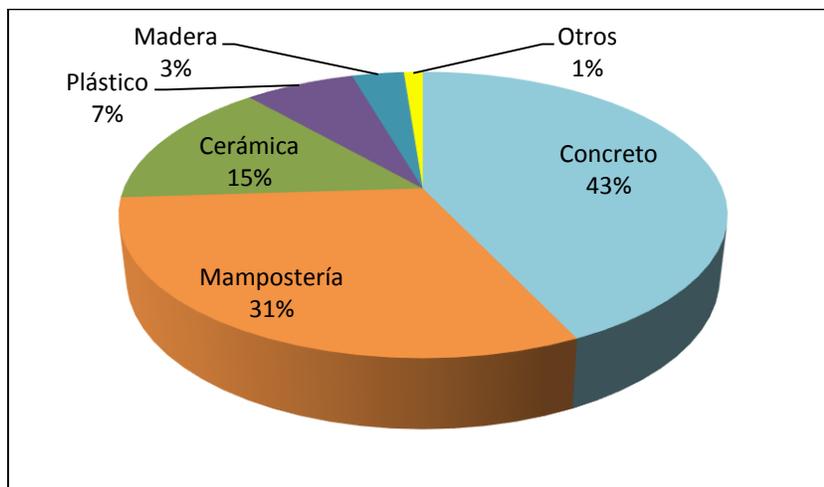


Figura 45. Composición de RCD en vertederos

La extracción se realizó de un área de vertederos a cielo abierto de la ciudad de Mérida, Yucatán, seleccionando aleatoriamente 10 sitios de un total de 30. Los resultados se consideran válidos ya que el material fue completamente heterogéneo, proveniente de elementos estructurales variados que reflejan la realidad de la construcción en la región.

Estos resultados fueron consistentes en comparación a lo encontrado en otras partes del mundo, como se aprecia en la Tabla 16.

Tabla 16. Composición de RCD en diferentes partes del mundo

<i>Lugar</i>	<i>Residuos, %</i>			<i>Referencia</i>
	<i>Concreto</i>	<i>Mampostería</i>	<i>Cerámica</i>	
México	48	18	21	Domínguez, 2008
Brasil	44	13	13	Angulo et al., 2003
Grecia	40	--	30	Oikonomou, 2005
Alemania	39	42	--	Müller, 2006

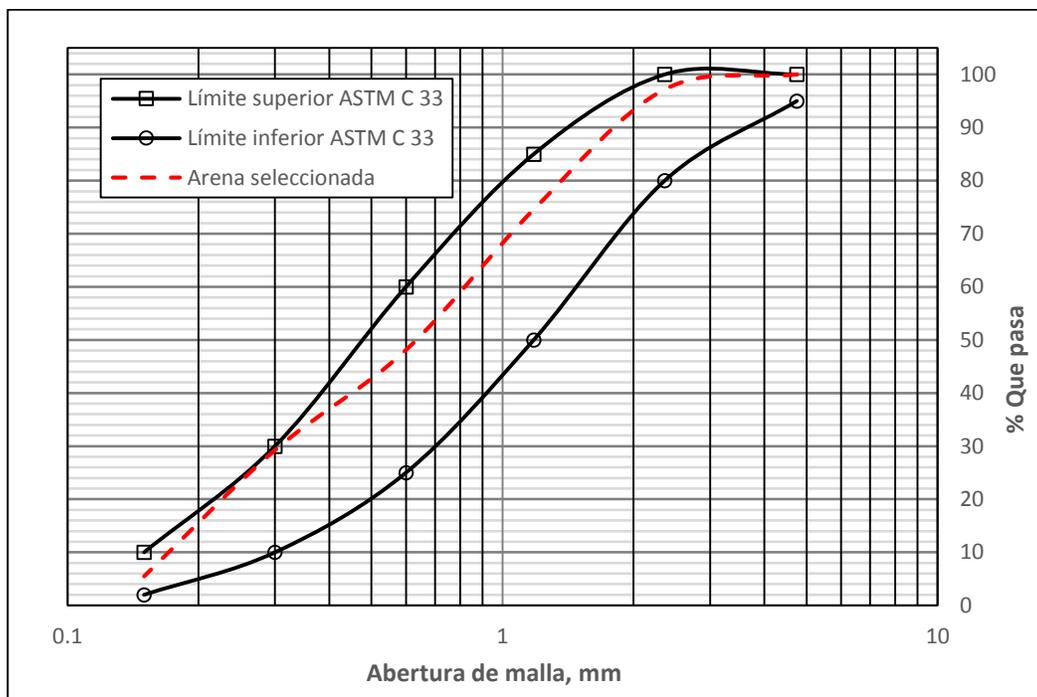


Figura 47. Granulometría del agregado fino

Tabla 17. Resultados de las pruebas físicas de los agregados

Pruebas	Agregado grueso		Agregado fino
	Reciclado	Normal	
PVSS, kg/m ³	1102	1187	1146
PVSC, kg/m ³	1235	1401	---
Densidad Relativa	2.31	2.33	2.38
Absorción, %	7.2	6.7	6.2
Desgaste, %	30	28	---
Módulo de finura, %	---	---	2.4
Índice de lajas	0.15	0.14	---
Índice de forma alargada	0.26	0.12	---

Comparando los resultados de las pruebas efectuadas para ambos tipos de agregado grueso, se observa que la grava reciclada posee características ligeramente desfavorables, lo cual revela que las propiedades del agregado grueso en el concreto de origen no fueron muy diferentes de la grava normal seleccionada.

Es de resaltar la poca diferencia en cuanto a densidad, absorción y desgaste entre la grava normal y la reciclada. El agregado fino por su parte, tiene características aceptables en cuanto a densidad, peso y módulo de finura. De cualquier forma, si se toman en cuenta los criterios para clasificar la calidad de los agregados calizos de alta absorción, establecidos por Solís y Moreno (2008), puede decirse que tanto las gravas, normal y reciclada, así como el agregado fino, se encuentran dentro del rango permisible de materiales utilizados en la región de estudio.

5.3. Diseño de mezclas de concreto

De acuerdo con la metodología propuesta el diseño de mezclas de concreto se efectuó mediante el método de volúmenes absolutos del ACI, fijando los valores de la relación agua/cemento y ajustando el volumen de los agregados. La nomenclatura empleada para diferenciar cada tipo de concreto se llevó a cabo con las siglas CN (concreto normal) o CR (concreto reciclado) seguido del porcentaje de sustitución del agregado grueso (100, 75, 50 ó 25). El último dígito se añadió para definir la relación agua/cemento utilizada (5 para 0.5 y 7 para 0.7). De acuerdo con la norma NMX-C-159-ONNCCE-2004 se consideró una absorción efectiva del 80% en los agregados pétreos para la corrección del agua de mezclado. Las cantidades relativas de los materiales en el diseño de mezclas expresadas en kg/m^3 , se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Composición de las mezclas de concreto, kg/m^3

Mezcla	Agua	Cemento	Grava normal	Grava reciclada	Arena
CN5	205	410	987	0	527
CR25-5	205	410	719	240	556
CR50-5	205	410	465	465	580
CR75-5	205	410	226	677	609
CR100-5	205	410	0	874	635
CN7	205	293	987	0	615
CR25-7	205	293	719	240	644
CR50-7	205	293	465	465	669
CR75-7	205	293	226	677	698
CR100-7	205	293	0	874	723

5.4. Propiedades de los concretos en estado fresco

Inmediatamente después del tiempo de mezclado del concreto se obtuvieron muestras para determinar el peso volumétrico, el revenimiento y el contenido de aire atrapado, cuyos resultados se registran en la Tabla 19.

Tabla 19. Propiedades de los concretos en estado fresco

<i>Mezcla</i>	<i>Peso Unitario kg/m³</i>	<i>Revenimiento cm</i>	<i>Aire atrapado %</i>
CN5	2151	10.0	3.5
CR25-5	2122	11.0	3.7
CR50-5	2128	11.0	3.9
CR75-5	2116	11.0	4.0
CR100-5	2116	11.0	4.0
CN7	2104	10.5	3.5
CR25-7	2102	11.0	3.5
CR50-7	2102	10.5	3.6
CR75-7	2096	11.0	3.6
CR100-7	2081	11.5	4.0

El peso volumétrico de todas las mezclas estuvo por debajo de 2200 kg/m³. Los pesos volumétricos más altos correspondieron a los concretos de control y aquellos con menor %R. Asimismo, se aprecia cierta variación en los revenimientos obtenidos con una buena trabajabilidad. Por otra parte, se tuvo un ligero aumento en el contenido de aire atrapado entre los concretos con 100%R en comparación a los concretos de control.

5.5. Propiedades de los concretos en estado endurecido

Después de su fabricación, cada uno de los especímenes de concreto fue sometido a un proceso de curado por inmersión durante un lapso de 28 días, al término del cual se efectuaron pruebas físicas como porosidad, densidad aparente y absorción, así como pruebas mecánicas como resistencia a la compresión (f_c) y módulo de elasticidad (E_c), cuyos resultados promedio se muestran en la Tabla 20. Los resultados completos pueden encontrarse en la sección de apéndices.

Tabla 20. Pruebas físicas y mecánicas de los concretos

Mezcla	Porosidad total %	Densidad aparente	Absorción %	fc MPa	Ec GPa
CN5	18.4	1.95	9.5	32.5	20.1
CR25-5	20.8	1.97	10.6	31.6	18.6
CR50-5	22.2	1.87	11.9	30.8	16.9
CR75-5	23.1	1.88	12.3	29.8	16.1
CR100-5	23.5	1.88	12.5	29.8	15.0
CN7	23.6	1.86	12.7	23.7	15.9
CR25-7	24.5	1.85	13.2	23.1	10.9
CR50-7	25.1	1.83	13.7	22.5	11.0
CR75-7	25.5	1.83	13.9	21.0	10.7
CR100-7	25.7	1.84	13.9	19.0	9.2

Los concretos con agregados reciclados tuvieron densidades aparentes más bajas que los concretos de control, aunque la variación no fue significativa (menor a 5%). Los valores de porosidad estuvieron sensiblemente por encima del límite de 15% establecido por la Red DURAR (2000), pero muy semejantes entre sí, lo que puede indicar poca influencia de los agregados reciclados y las relaciones agua/cemento empleadas. En cuanto a la absorción, todos los valores alcanzados por los concretos con agregados reciclados, fueron aumentando respecto de la mezcla de control en la medida que aumentó %R; entre 11 y 32% para las mezclas con 0.5 a/c y entre 4 y 9% para las mezclas con 0.7 a/c.

Los concretos diseñados con 0.5 a/c demostraron una ligera reducción de su f_c en la medida que aumentó %R, con pérdidas de 3 a 8%. Estos resultados guardan similitud con lo reportado por otros autores como: Xiao et al. (2005) de 6 a 12% para 0.43 a/c y Bairagi et al (1993) de 5 a 17%. Los concretos diseñados con 0.7 a/c en esta investigación tuvieron un desempeño a la compresión muy similar entre sí hasta el límite de 50%R, a partir del cual disminuyó perceptiblemente la resistencia hasta alcanzar una reducción de 21% en comparación con el concreto de control, parecido a lo reportado recientemente por Lovato et al. (2012) con disminuciones que van de 6 a 23% para 0.65 a/c en promedio y Topçu y Sengel (2004) de 17 a

26% para 0.6 a/c. Los resultados anteriores indican que la relación a/c tiene influencia preponderante en la pérdida de resistencia para cada %R del agregado grueso utilizado, tal y como se hace notar en la Figura 48.

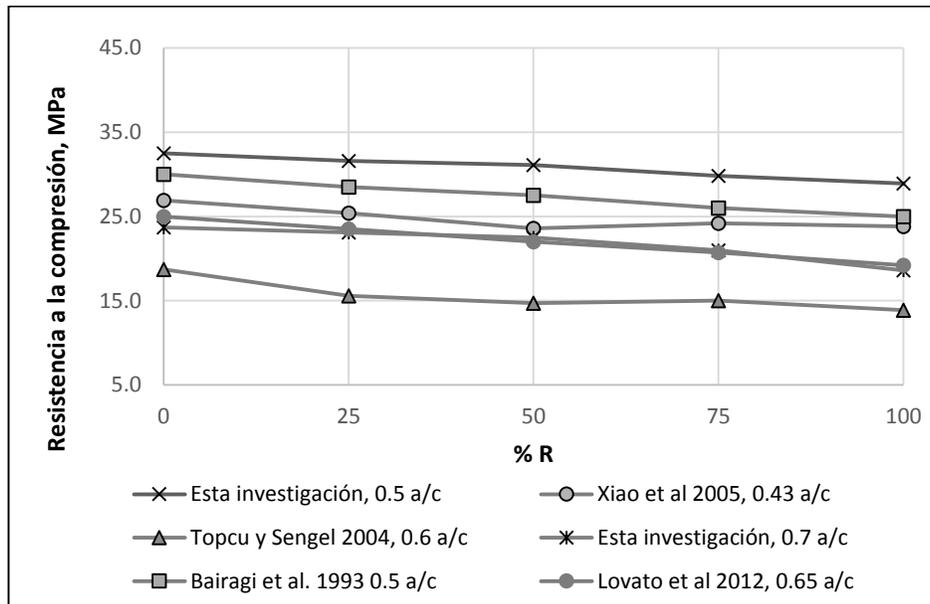


Figura 48. f_c en función de %R

Puede observarse que los valores de E_c de los concretos con agregado reciclado son inferiores a los alcanzados por los concretos con agregado normal en la medida que aumentó el %R del agregado grueso, con diferencias que van de 7% a 25% para 0.5 a/c, muy semejante a lo reportado por Bairagi et al. (1993) y Lovato et al. (2012), para 0.5 a/c y 0.65 a/c, respectivamente. Reducciones mayores de E_c , fueron reportadas por Xiao et al. (2005), de 39% a 46%, y por Rao et al. (2011), de 25% a 35%, ambos para 0.43 a/c. Los valores actuales de E_c para 0.7 a/c tuvieron disminuciones de 32% a 42% (Figura 49). La principal razón de estas variaciones se atribuye a la reducción del módulo de elasticidad en los agregados reciclados utilizados.

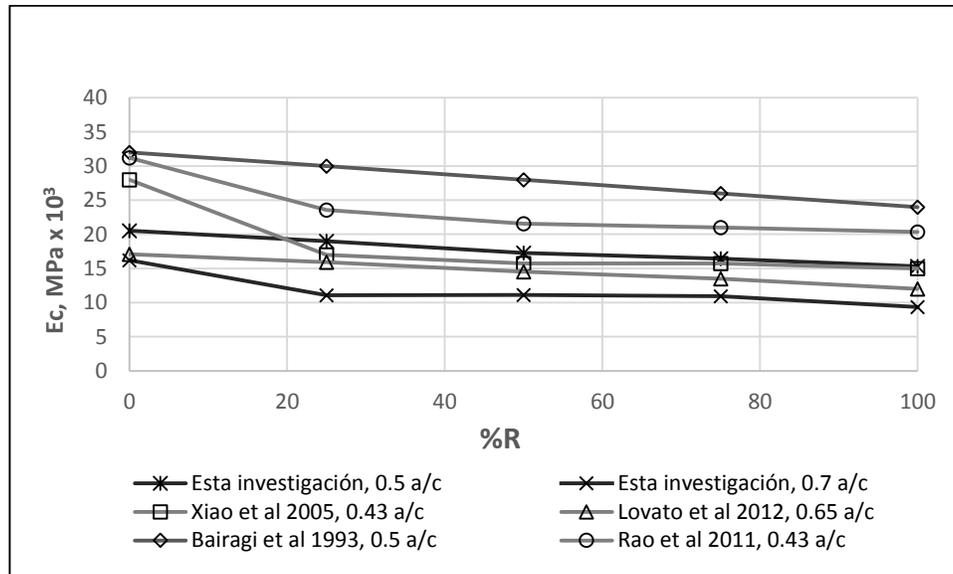


Figura 49. Ec en función de %R

En las Figuras 50 y 51, se presentan las gráficas de esfuerzo-deformación de todos los concretos fabricados para las relaciones a/c ensayadas. Los resultados indican disminución de esta relación de acuerdo con el incremento del %R del agregado grueso reciclado para las dos a/c ensayadas.

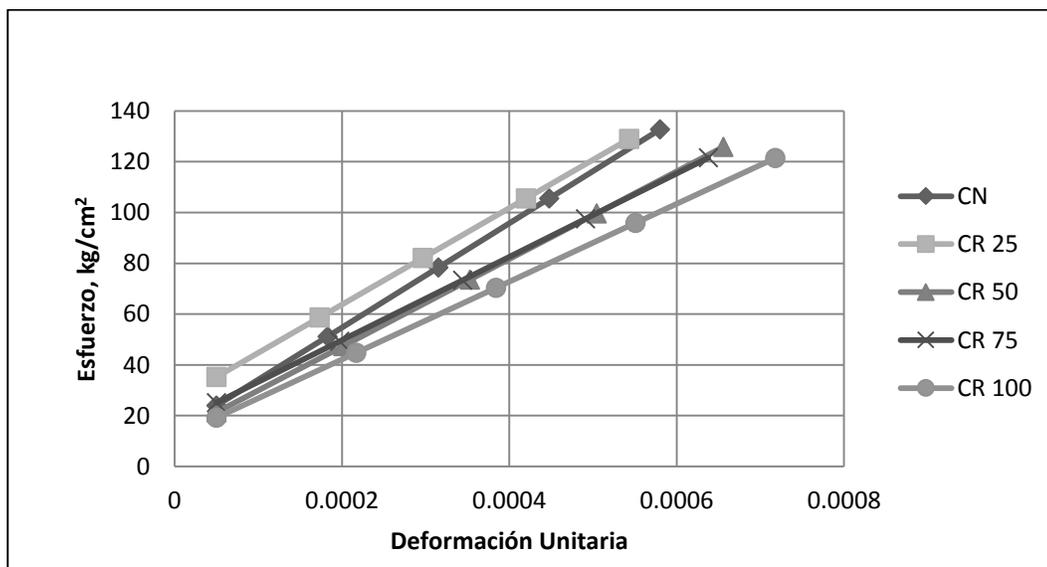


Figura 50. Esfuerzo-Deformación para concretos con 0.5 a/c

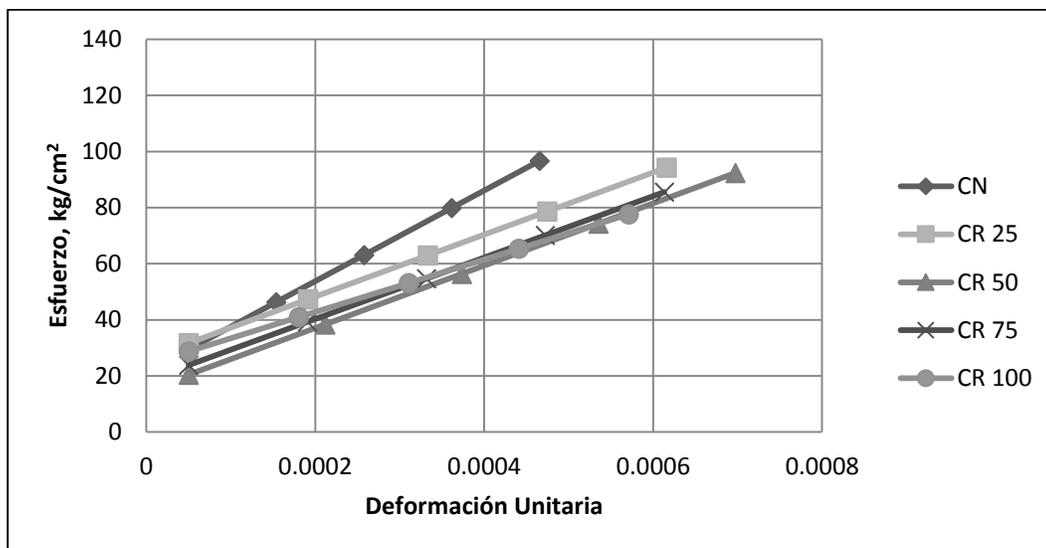


Figura 51. Esfuerzo-Deformación para concretos con 0.7 a/c

En diferentes reglamentos internacionales se han recomendado ecuaciones para modelar el comportamiento del módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, dichas ecuaciones subestiman su valor en afán de quedar del lado de la seguridad en el diseño. Por otro lado, algunos investigadores han propuesto ecuaciones que se ajustan a sus mejores resultados experimentales, de tal forma que no es posible generalizarlas y aplicarlas a cualquier tipo de material, tal es el caso cuando se trata de concreto reciclado con peso volumétrico (Wc) menor a 2200 kg/m^3 . En la Figura 52 se han comparado los resultados hallados en la presente investigación con las siguientes ecuaciones reportadas en la literatura:

ACI 318 (para valores de Wc entre 1440 y 2480 kg/m^3):

$$E_c = 0.043Wc^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (7)$$

Mellmann (1999), sugiere en el caso de agregados provenientes de escombros de concreto:

$$E_c = 378f'_c + 8242 \quad (8)$$

Tassew y Lubell (2012), sugieren en el caso de agregados de bajo peso provenientes de residuos de cerámica:

$$E_c = 0.031Wc^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

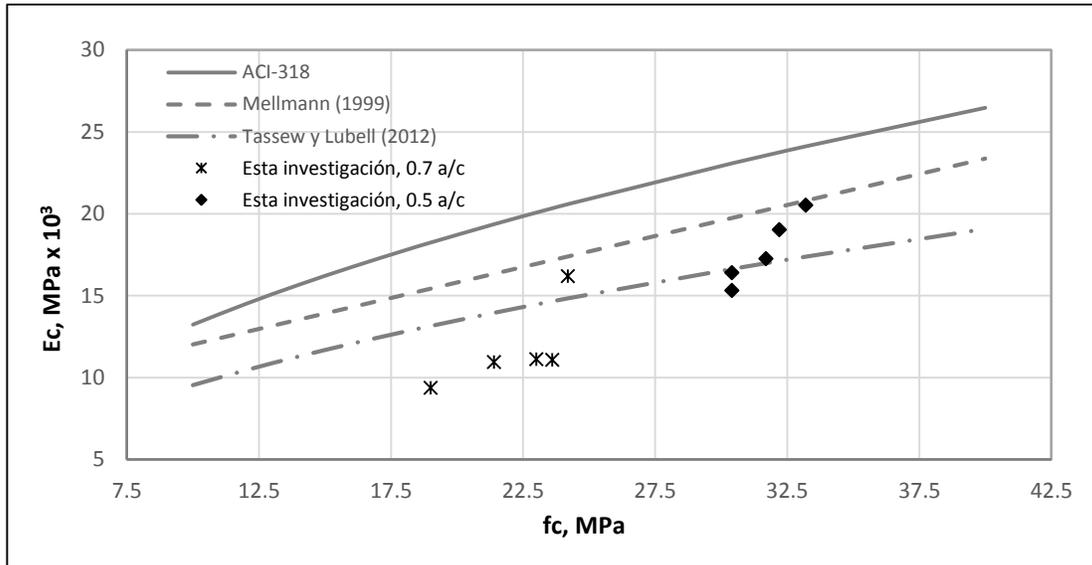


Figura 52. E_c vs f_c en concretos con agregados reciclados

En la gráfica anterior se observan una serie de datos experimentales entre los valores predichos por las ecuaciones de Mellmann (1999) y Tassew y Lubell (2012) que corresponden a concretos con agregado grueso reciclado con 0.5 a/c y el concreto de control 0.7 a/c. El resto de los valores, quedaron por debajo, denotando las limitaciones del tipo de material utilizado. Como era de esperarse, la ecuación propuesta por el ACI 318 queda muy por encima, pues está diseñada para concretos fabricados con agregados normales.

5.5.1. Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados estadísticamente utilizando Statgraphics Plus® v5.1. De inicio, se determinaron medidas de tendencia central, de variabilidad y de forma, para comprobar la normalidad de los datos, tal y como puede verse en la Tabla 21.

Tabla 21. Análisis de normalidad de los datos

Parámetro	Resistencia a la compresión	Módulo de elasticidad
Frecuencia	50	30
Media	26.4	14434
Desviación estándar	4.8	3687
Coeficiente de asimetría	-0.29	0.03
Coeficiente de curtosis	-1.96	-1.56

En ambos casos, los coeficientes de asimetría y curtosis se ubicaron dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal (± 2).

Posteriormente se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de tipo multifactorial. La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad fueron consideradas como variables dependientes en cada proceso y los factores %R y a/c como variables independientes. Para resistencia a la compresión se examinaron 50 casos completos y 30 para módulo de elasticidad, ambos con 95% de confianza. Los resultados se concentran en las Tablas 22 y 23.

Tabla 22. ANOVA multifactorial para resistencia a la compresión

Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Significancia
%R	90.41	4	22.60	42.08	0.0000
a/c	1016.01	1	1016.01	1891.59	0.0000
Interacción	10.14	4	2.53	4.71	0.0033
Residuos	21.48	40	0.54		
Total (corregido)	1138.04	49			

Tabla 23. ANOVA multifactorial para módulo de elasticidad

Factores	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Significancia
%R	1.74E8	4	2.94E7	56.17	0.0000
a/c	2.56E8	1	2.56E8	490.72	0.0000
Interacción	9.93E6	4	2.48E6	4.75	0.0076
Residuos	1.05E7	20	522562		
Total (corregido)	3.94E8	29			

Con el análisis de varianza se comprobó la importancia de cada uno de los factores. La significancia resultó inferior a 0.05, tanto de manera individual como interactiva, lo que indica un efecto estadísticamente significativo en las variables dependientes, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Por otra parte, se aplicó el método LSD (Montgomery, 2011) a fin de determinar grupos homogéneos para %R, mediante una prueba de rangos múltiples, como puede verse en la Tabla 24.

Tabla 24. Prueba de rangos múltiples para %R

% R	Resistencia a la compresión				Módulo de elasticidad					
	MPa				MPa					
	Media	Grupos homogéneos			Media	Grupos homogéneos				
0	28.12	X				17997	X			
25	27.36		X			14752		X		
50	26.73		X			13909		X	X	
75	25.39			X		13415			X	
100	24.39				X	12098				X

En cuanto a resistencia a la compresión, se observa diferencia entre el concreto de 0%R con todos los demás. Existe similitud entre los concretos de 25%R y 50%R, los que a su vez son estadísticamente diferentes de los concretos de 75%R y 100%R. Por lo que toca a módulo de elasticidad, la similitud se encuentra entre los

concretos de 25%R, 50%R y 75%R, siendo los de 0%R y 100%R estadísticamente diferentes. En conjunto, es posible inferir un comportamiento mecánico-elástico consistente a partir del límite de 50%R.

5.6. Propiedades de transporte

Posterior a las pruebas físicas y mecánicas de los concretos, se determinaron tres propiedades de transporte de fluidos en el concreto, relacionados en forma indirecta con la durabilidad, tales como porosidad total, absorción capilar y permeabilidad al aire. Asimismo, se analizaron dos indicadores directos: resistencia a la carbonatación y penetración de cloruros. Los resultados han sido comparados con índices reportados en la literatura a fin de determinar hasta qué punto es posible reemplazar el agregado grueso normal por agregado grueso reciclado.

5.6.1. Resultados de porosidad y absorción capilar

En las Figuras 53 y 54 se muestran los resultados obtenidos de porosidad total y velocidad de absorción capilar (sorptividad), para cada una de las mezclas de acuerdo al %R empleado. Todos los valores de porosidad total estuvieron muy cercanos entre sí y por encima de 12.5% reportado por Buyle y Zaharieva (2002) y del valor límite de 17% (CEB, 1998), pero similar al rango de 18-20% reportado por Gómez-Soberón (2002) para mezclas con 0.5 a/c. Sin embargo, cuando se emplean agregados con alta absorción, la porosidad no es un indicador concluyente de la calidad del concreto, y se hace necesario el empleo de otras pruebas directas e indirectas para determinar su comportamiento en términos de durabilidad (Solís y Moreno, 2006).

La sorptividad fue calculada con las ecuaciones 10 y 11 de acuerdo al método Noruego propuesto por Fagerlund (1986).

$$S = \frac{1}{m^{0.5}} \quad (10)$$

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (11)$$

Dónde S es la sorptividad en $\text{mm}/\text{h}^{0.5}$; m es la resistencia a la penetración del agua (s/m^2); t es el tiempo requerido para la ascensión capilar (s); y z es la profundidad de penetración del agua en el tiempo t (m).

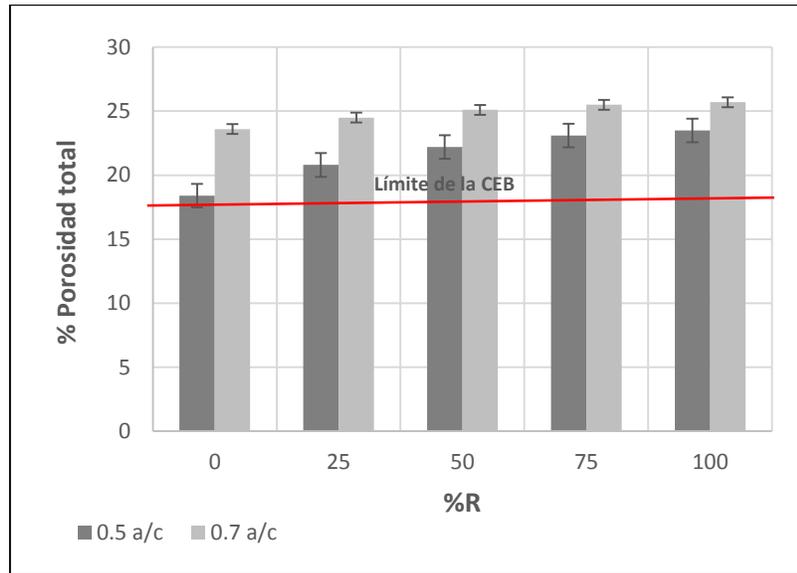


Figura 53. Porosidad total en función de %R

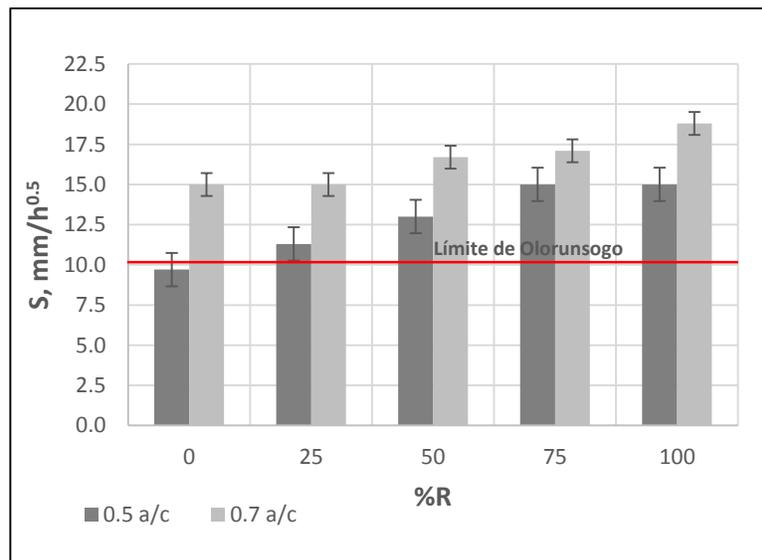


Figura 54. Sorptividad en función de %R

Los valores de sorptividad se incrementaron ligeramente en la medida que aumentó %R. Todos los resultados estuvieron por encima del límite de $3 \text{ mm/h}^{0.5}$ sugerido por la Red DURAR (2000) para concretos en ambientes agresivos. Las mezclas de 0.5 a/c con 25, 50, 75 y 100%R y las de 0.7 a/c con 0 y 25%R se ubicaron en el rango de 10 a $15 \text{ mm/h}^{0.5}$. El resto alcanzó valores por encima, lo que denotaría una clase de durabilidad muy pobre en el concreto.

En una investigación independiente realizada en la FIUADY (Alcocer, 2014) se ensayaron concretos con agregados normales, alcanzando valores de sorptividad cercanos a $9 \text{ mm/h}^{0.5}$ para 0.5 a/c y de $13 \text{ mm/h}^{0.5}$ para 0.7 a/c, consistentes con los obtenidos en esta investigación para 0%R

Por otro lado, autores como Olorunsogo y Padayachee (2002) han reportado valores muy altos de sorptividad para concretos con agregados reciclados ($15\text{-}20 \text{ mm/h}^{0.5}$). Los índices que utilizaron para calificar la durabilidad del concreto en función de la sorptividad se señalan en la Tabla 25.

Tabla 25. Calificación de la durabilidad en función de la sorptividad en concretos con agregados reciclados

Sorptividad, $\text{mm/h}^{0.5}$	Clase de durabilidad
< 6.0	Excelente
6.0 – 10.0	Buena
10.0 – 15.0	Pobre
> 15.0	Muy pobre

En esta investigación, la mezcla de control CN5 fue la única por debajo del límite de $10 \text{ mm/h}^{0.5}$, dentro del rango de buena durabilidad, según la Tabla 25.

El comportamiento de ambas familias de concreto a lo largo de toda la prueba se observa en las Figuras 55 y 56 donde la absorción capilar después de 6 horas, tuvo muy poca variación.

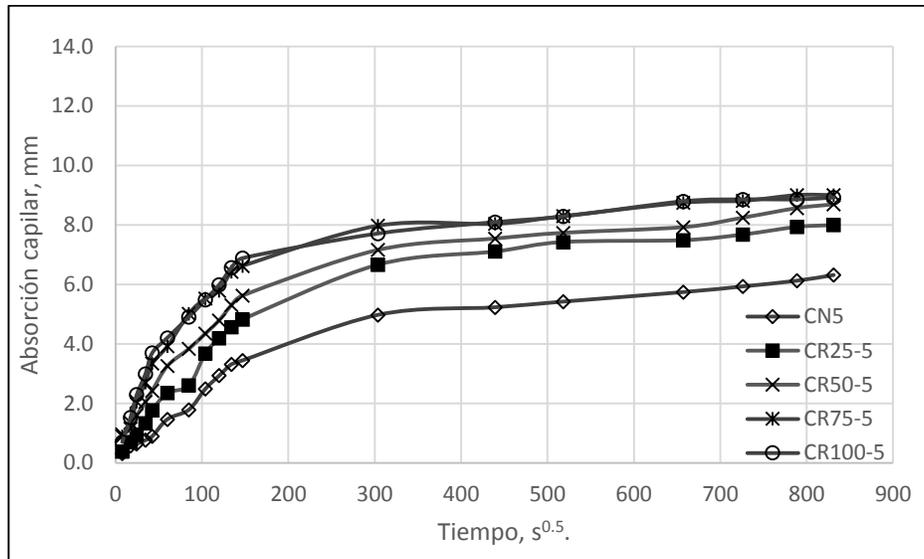


Figura 55. Absorción capilar en función del tiempo para 0.5 a/c

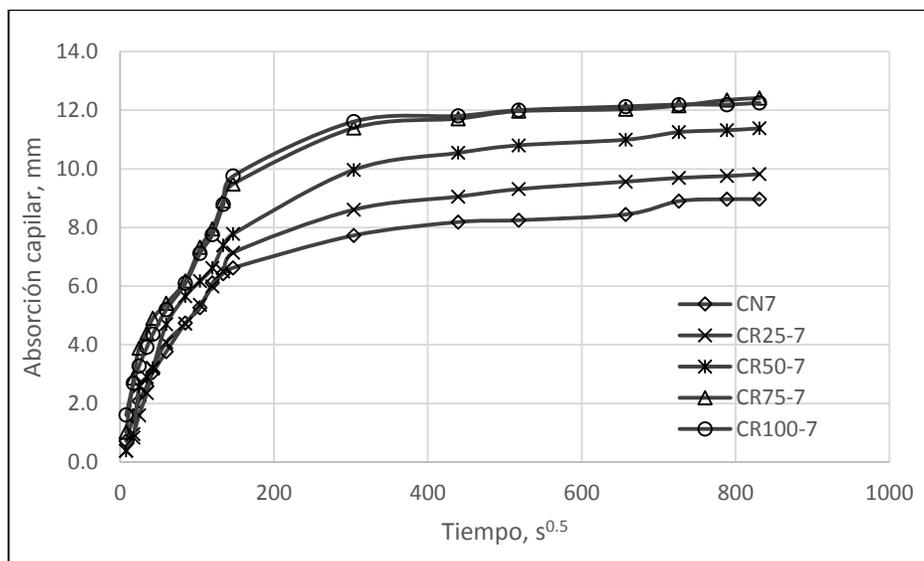


Figura 56. Absorción capilar en función del tiempo para 0.7 a/c

5.6.2. Resultados de permeabilidad al aire

Esta prueba se desarrolló cumplidos 62 días de secado al ambiente de laboratorio, con objeto de evitar problemas de resistividad por el contenido de humedad en las probetas. Los resultados promedio en $m^2 \times 10^{-16}$, se indican en la Tabla 26.

Tabla 26. Resultados promedio de kT, m² x 10⁻¹⁶

%R	0.5 a/c	0.7 a/c
0	0.556	1.545
25	0.808	1.733
50	0.986	1.779
75	1.244	1.807
100	1.292	2.020

El modelo desarrollado para obtener el coeficiente de permeabilidad al aire, tiene fundamento en la Ley de Hagen-Poiseuille para fluidos compresibles, indicada en la ecuación 12 (Torrent et al., 2012).

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_i}{P_a - \Delta P_i}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad (12)$$

Donde kT, es el coeficiente de permeabilidad al aire (m² x 10⁻¹⁶); V_c el volumen de la cámara interior de vacío (m³); A el área de la sección transversal de la cámara interior de vacío (m²); μ la viscosidad del aire (2 x 10⁻⁵ N s/m²); ε la porosidad estimada de la superficie de concreto; P_a la presión atmosférica (N/m²); ΔP_i la presión alcanzada en la cámara interior de vacío en el momento t_f; t_f el tiempo final de la prueba (s); t₀, el tiempo de inicio de la prueba (60 s). Dado que el equipo utilizado en estas pruebas se encuentra calibrado para valores constantes de porosidad igual a 0.15, fue necesario ajustar los resultados directamente proporcionados por el aparato, empleando los valores de porosidad reales previamente determinados.

Los coeficientes de permeabilidad al aire aumentaron de 24 a 64% en la medida que se incrementó %R. Los concretos con 0.5 a/c con 0, 25 y 50%R estuvieron dentro del rango de 0.1 < kT < 1.0 m² x 10⁻¹⁶, lo que se considera de calidad normal. Todas las demás mezclas tuvieron valores de kT por encima de 1.0, lo que indica una calidad pobre de la superficie de concreto (Figura 57).

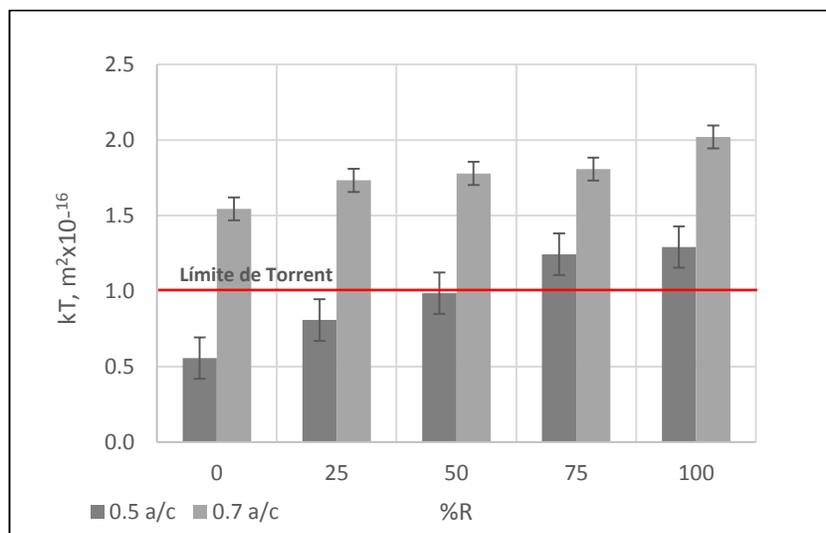


Figura 57. Permeabilidad al aire en función de %R

5.7. Resultados de carbonatación natural y acelerada

Los resultados promedio de las pruebas de carbonatación natural y acelerada para cada una de las mezclas de concreto, se presentan en las Tablas 27 a 30.

Tabla 27. Carbonatación natural en concretos con 0.5 a/c

Mezcla	Día 0			Día 35			Día 70			k_n
	t	p_f	k	t	p_f	k	t	p_f	k	
CN5	344	3.64	3.7	379	4.60	4.5	414	5.36	5.0	4.47
CR25-5	302	4.02	4.4	337	4.84	5.0	372	5.64	5.6	5.06
CR50-5	309	4.50	4.9	344	5.36	5.5	379	6.30	6.2	5.58
CR75-5	302	5.17	5.7	337	6.16	6.4	372	6.67	6.6	6.27
CR100-5	314	5.69	6.1	349	6.67	6.8	384	7.42	7.2	6.77

Tabla 28. Carbonatación natural en concretos con 0.7 a/c

Mezcla	Día 0			Día 35			Día 56			k_n
	t	p_f	k	t	p_f	k	t	p_f	k	
CN7	338	5.64	5.9	373	6.77	6.7	394	7.51	7.2	6.63
CR25-7	288	5.97	6.7	323	7.79	8.3	344	8.92	9.2	8.14
CR50-7	302	7.00	7.7	337	9.06	9.4	358	10.27	10.4	9.24
CR75-7	295	7.65	8.5	330	9.38	9.9	351	10.31	10.5	9.69
CR100-7	308	7.97	8.7	343	9.69	10.0	364	10.67	10.7	9.84

Tabla 29. Carbonatación acelerada en concretos con 0.5 a/c

Mezcla	Día 14			Día 35			Día 70			k_a
	t	p_f	k	t	p_f	k	t	p_f	k	
CN5	14	6.02	24.5	35	11.63	35.7	70	17.49	38.5	36.21
CR25-5	14	7.23	30.7	35	13.00	39.9	70	19.36	42.8	40.45
CR50-5	14	8.70	38.0	35	14.82	45.6	70	20.70	45.7	44.59
CR75-5	14	9.42	40.2	35	15.19	46.1	70	21.52	47.1	45.81
CR100-5	14	10.67	46.1	35	18.20	55.8	70	26.17	57.8	55.61

Tabla 30. Carbonatación acelerada en concretos con 0.7 a/c

Mezcla	Día 14			Día 35			Día 56			k_a
	t	p_f	k	t	p_f	k	t	p_f	k	
CN7	14	11.15	49.1	35	18.28	56.1	56	23.55	58.4	56.17
CR25-7	14	14.70	68.6	35	21.77	67.6	56	25.91	64.4	66.34
CR50-7	14	17.64	82.7	35	23.28	71.7	56	26.48	65.2	71.49
CR75-7	14	19.00	88.8	35	23.55	71.9	56	26.50	64.8	73.18
CR100-7	14	19.15	88.9	35	23.79	72.4	56	26.52	64.6	73.26

Las variables de carbonatación en las tablas anteriores, fueron calculadas con las ecuaciones 13 a 17.

$$k = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (13)$$

$$k = \sqrt{\frac{x^2 - x_0^2}{t}} \quad (14)$$

(Cuando se tiene carbonatación inicial)

$$k_n = \frac{\Sigma(k_i t_i)}{\Sigma t_i} \quad (15)$$

$$k_a = \frac{\Sigma k_i (x_i - x_0)}{\Sigma x_i - i * x_0} \quad (16)$$

$$p_f = re \sqrt{(1-p)2 \ln(1-p) + p(1 - \frac{p}{2})} \quad (17)$$

Dónde:

t, tiempo de exposición natural o acelerada, en días.

p_f , profundidad de carbonatación ajustada para una forma plana infinita

k, coeficiente de carbonatación (mm/año^{0.5})

k_n , promedio ponderado del coeficiente de carbonatación natural

k_a , promedio ponderado del coeficiente de carbonatación acelerada

x, profundidad de carbonatación el día de prueba, equivalente a p_f , en mm

x_0 , profundidad de carbonatación al inicio de la exposición acelerada, en mm

i, número de pruebas efectuadas durante el periodo de exposición

re, radio nominal del espécimen de prueba

p, relación entre el frente de carbonatación promedio y el radio nominal

Una vez obtenidos los coeficientes de carbonatación naturales y acelerados, se procedió a convertirlos a valores atmosféricos, así como a determinar la eficiencia de la cámara empleada, tal y como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Coeficientes de carbonatación convertidos

Mezcla	C_a	C_c	K_a	K_c	K_n	% ε
CN5	0.00051	0.04	36.21	4.09	4.47	91.5
CR25-5	0.00051	0.04	40.45	4.57	5.06	90.4
CR50-5	0.00051	0.04	44.59	5.04	5.58	90.3
CR75-5	0.00051	0.04	45.81	5.17	6.27	82.5
CR100-5	0.00051	0.04	55.61	6.28	6.77	92.8
CN7	0.00051	0.04	56.17	6.34	6.63	95.7
CR25-7	0.00051	0.04	66.34	7.49	8.14	92.0
CR50-7	0.00051	0.04	71.49	8.07	9.24	87.4
CR75-7	0.00051	0.04	73.18	8.26	9.69	85.3
CR100-7	0.00051	0.04	73.26	8.27	9.84	84.1

Los coeficientes de carbonatación K_c se obtuvieron siguiendo el modelo simplificado indicado en la ecuación 18 (Moreno, 2013). La eficiencia de la cámara se determinó comparando los coeficientes de carbonatación en ambiente natural y acelerado de acuerdo con la ecuación 19.

$$K_c = K_a \sqrt{\frac{C_a}{C_c}} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{K_c}{K_n} \times 100 \quad (19)$$

Dónde K_c es el coeficiente de carbonatación convertido a valor atmosférico ($\text{mm/año}^{0.5}$); K_a el promedio ponderado del coeficiente de carbonatación acelerada ($\text{mm/año}^{0.5}$); C_a la concentración de CO_2 en el exterior de la cámara de aceleración al ambiente de laboratorio (0.051%); C_c la concentración de CO_2 en el interior de la cámara de aceleración (4%); ε la eficiencia de la cámara en %.

Los coeficientes de carbonatación convertidos a valores atmosféricos aumentaron de acuerdo con el incremento del %R. Para los concretos con 0.5 a/c de 0 a 75%R

alcanzaron valores aceptables entre 4 y 6 mm/año^{0.5}. En el resto de los concretos, K_c estuvo por encima de ese rango lo que denota poca resistencia a la carbonatación. En la figura 58 se comparan los resultados de K_c contra %R. Entre 0 y 100%R se observa una variación de 23% para las mezclas con 0.7 a/c y de 35% para las mezclas con 0.5 a/c, aunque esta última variación sólo es de 20% entre 0 y 75%R. Otros investigadores han reportado diferencias de 23% for 0.43 a/c (Amorim et al., 2012), 17% para 0.6 a/c (Lovato et al., 2012), 25% para 0.7 a/c (Levy y Helene, 2004) y 11% para 0.7 a/c (Otzuki et al., 2003). Una comparación efectiva de los valores de K_c no ha sido posible, pues los procedimientos experimentales fueron diferentes.

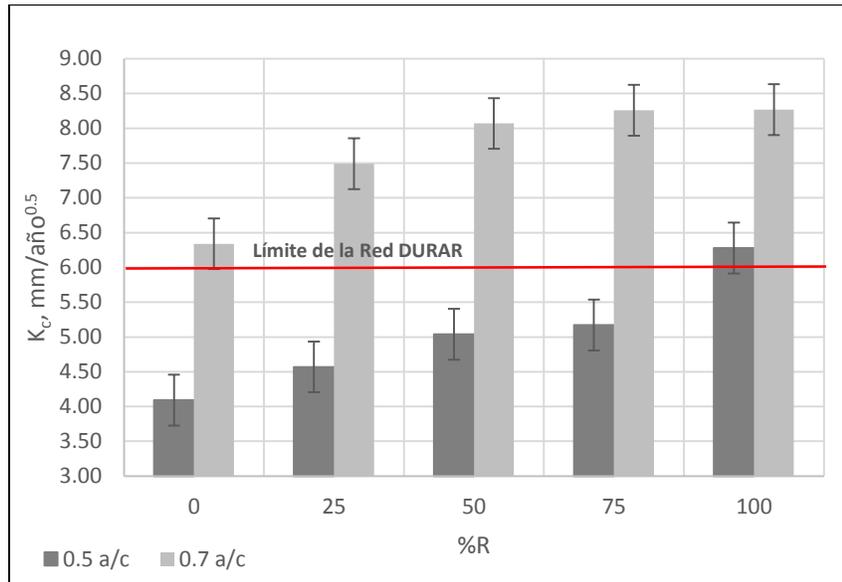


Figura 58. Carbonatación en función de %R

En las Figuras 59 y 60 se modela el avance del frente de carbonatación en función del tiempo para cada una de las mezclas. En el caso de concretos con 0.5 a/c el valor más desfavorable es el de la mezcla CR100-5 donde se estima que a 25 años, se tendría un avance de 32.5 mm. En los concretos con 0.7 a/c, los frentes de carbonatación a esa misma edad alcanzarían valores críticos de 40 mm. Resalta la similitud que se tiene entre la mezcla de mejor comportamiento con 0.7 a/c y la de peor comportamiento con 0.5 a/c.

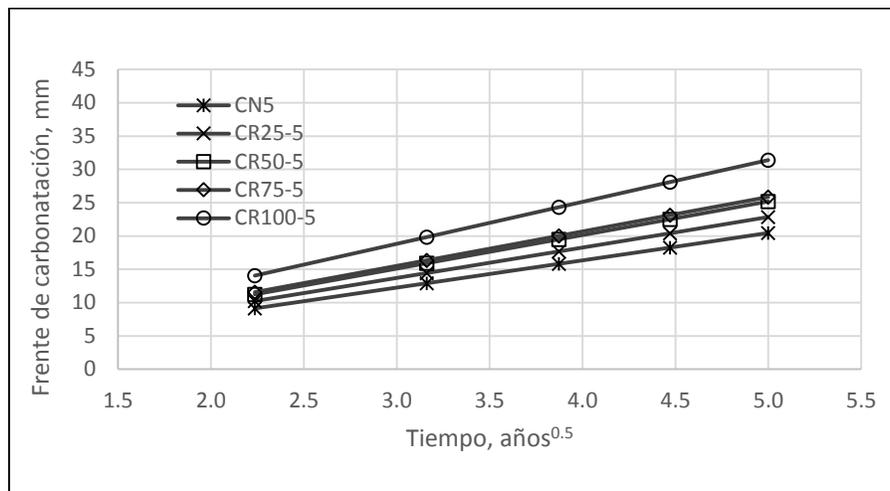


Figura 59. Avance modelado de los frentes de carbonatación para 0.5 a/c

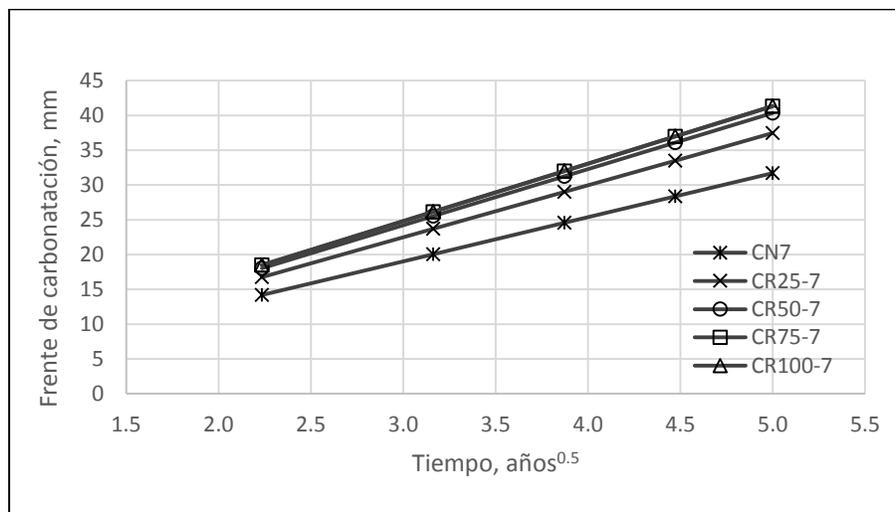


Figura 60. Avance modelado de los frentes de carbonatación para 0.7 a/c

En las figuras 61, 62 y 63, se analiza la relación entre los valores de carbonatación (K_c) con los valores de sorptividad (S), permeabilidad al aire (kT) Resistencia a la compresión (f_c), respectivamente. En todos los casos, los coeficientes de correlación (R) calculados quedaron dentro del rango de 0.7 a 0.9 lo que indica una dependencia moderadamente fuerte entre las variables estudiadas.

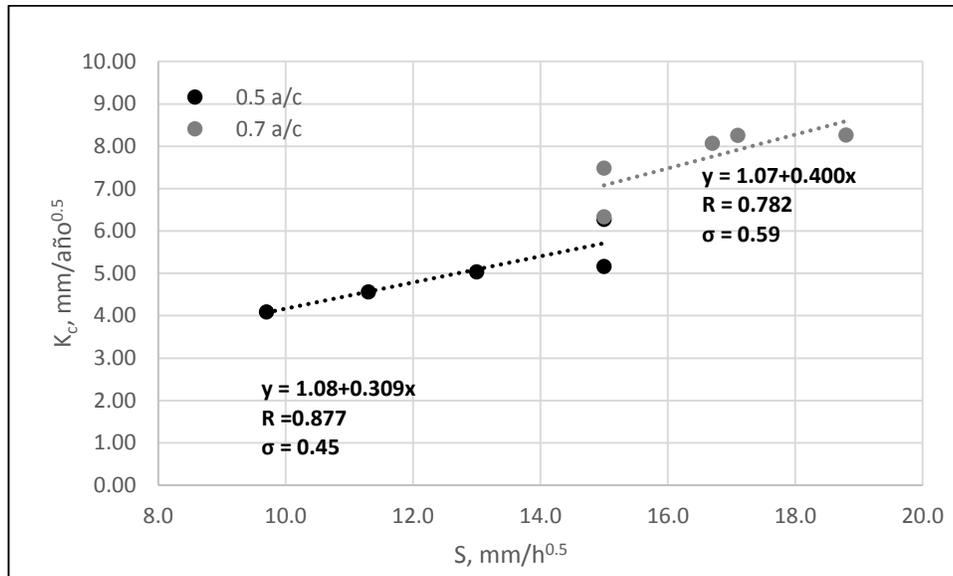


Figura 61. Carbonatación vs sorptividad

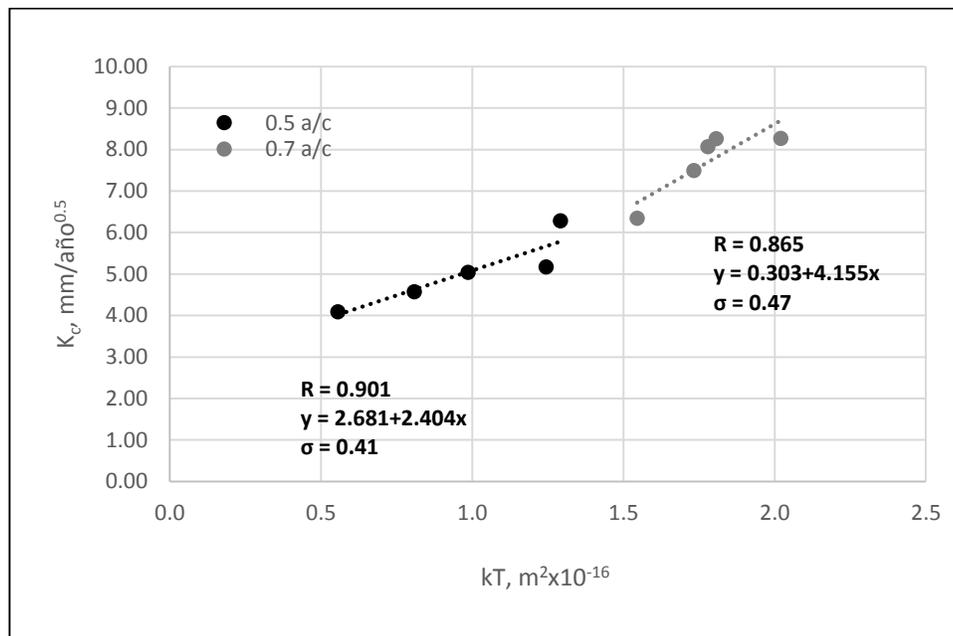


Figura 62. Carbonatación vs permeabilidad al aire

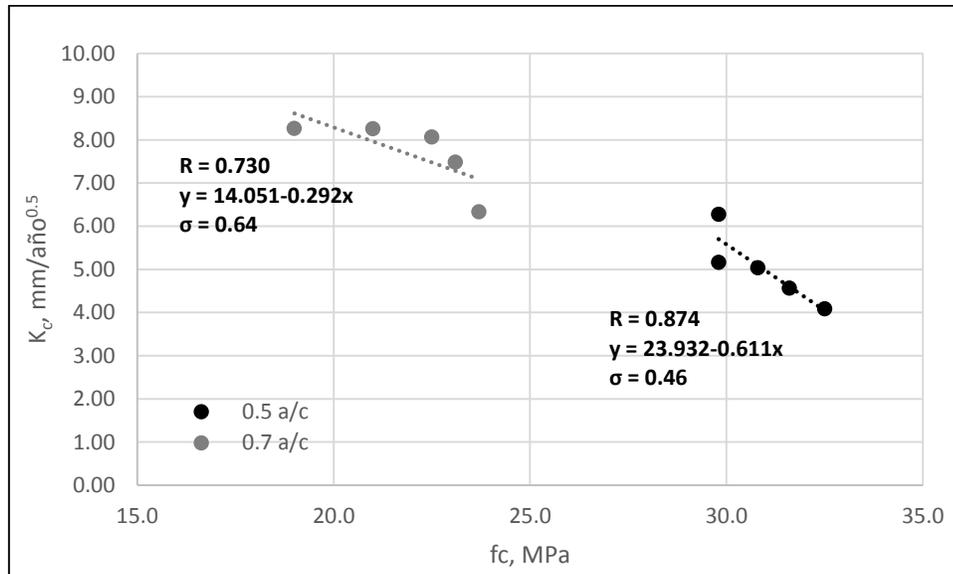


Figura 63. Carbonatación vs Resistencia a la compresión

5.8. Resultados de penetración de cloruros

En las Figuras 64 a 67 se presentan los perfiles de concentración de cloruros totales por peso de cemento a una profundidad máxima de 6 cm. El cálculo se efectuó a partir de la ecuación 20.

$$\%Cl = \frac{35.453VN}{10W} \quad (20)$$

Dónde:

$\%Cl$, es la concentración de cloruros por peso de concreto; V , el punto de intersección de la recta definida por los potenciales en el eje de las abscisas de una gráfica de Gran (mV); N la normalidad del nitrato de plata; W , es el peso de la muestra (g). Para expresar los resultados en % por peso de cemento, se multiplicó la concentración obtenida por el peso volumétrico del concreto, dividiendo luego por el peso volumétrico del cemento.

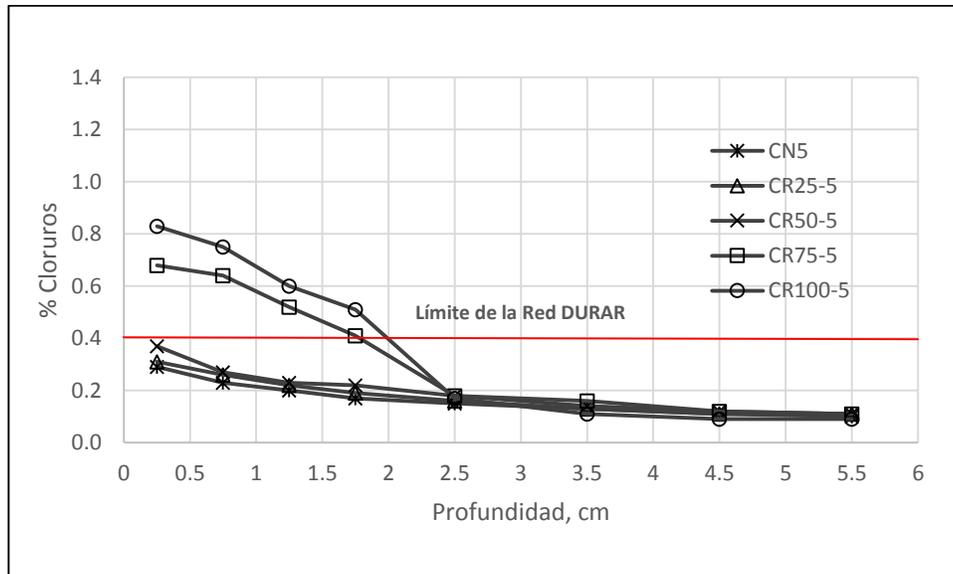


Figura 64. Perfil de cloruros en muestras sumergidas para 0.5 a/c

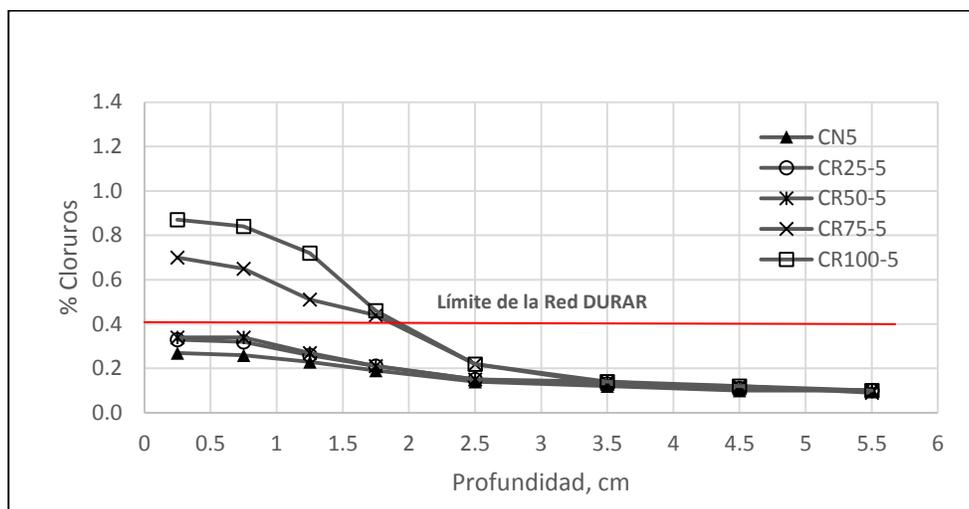


Figura 65. Perfil de cloruros en muestras de salpicadura para 0.5 a/c

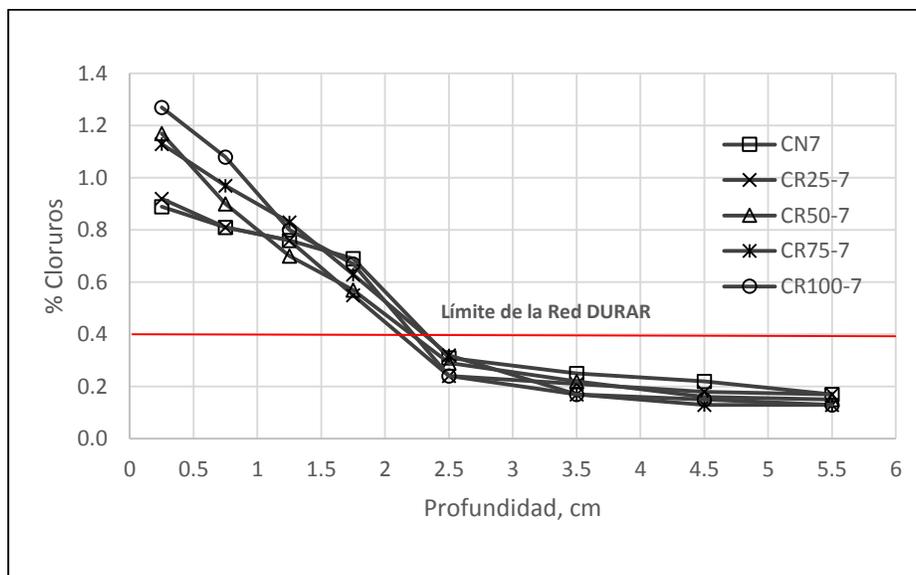


Figura 66. Perfil de cloruros en muestras sumergidas para 0.7 a/c

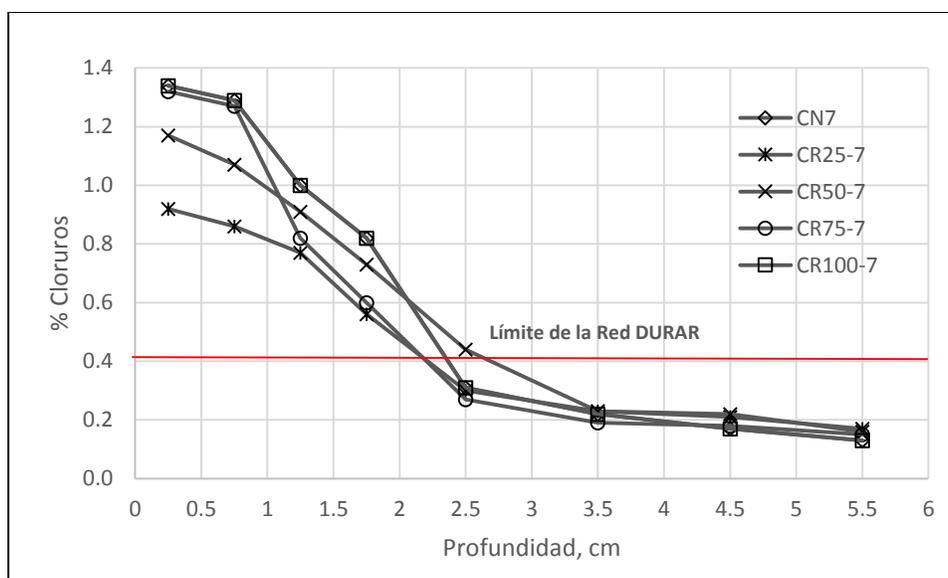


Figura 67. Perfil de cloruros en muestras de salpicadura para 0.7 a/c

Para 0.5 a/c, los concretos con 0, 25 y 50%R alcanzaron valores inferiores al límite permisible de 0.4% recomendado por la Red DURAR (2000). Las concentraciones en concretos con 75 y 100%R y todos los de 0.7 a/c estuvieron muy por encima de dicho valor. En todos los casos se observó un cambio de pendiente a partir de 2.5 cm de profundidad, donde hay un incremento significativo en la concentración de cloruros.

Los coeficientes de difusión fueron calculados con la ecuación 21 que da solución a la 2ª Ley de Fick en estado no estacionario.

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{Dt}} \right) \quad (21)$$

Dónde:

C_s , es la concentración de cloruros en la superficie; C_o , la concentración inicial de cloruros en el concreto; C_x , la concentración de cloruros a una profundidad x ; t , el tiempo de exposición; D , el coeficiente de difusión aparente de los cloruros (cm^2/s).

La solución de esta ecuación se realizó en forma iterativa utilizando la herramienta Mathcad®. Algunos de los modelos obtenidos se ejemplifican en el Apéndice 9.

Los resultados para muestras sumergidas y de salpicadura para cada mezcla de concreto pueden ser comparados en las Figuras 68 y 69, respectivamente, donde se observa que los coeficientes de difusión fueron en aumento de acuerdo con el %R utilizado. En los concretos con 0.5 a/c, la diferencia entre 0%R (control) y 100%R fue muy marcada (89%), mientras que en los concretos con 0.7 a/c fue apenas de 10%. Otzuki et al. (2003) han reportado diferencias de 17% para 0.55 a/c y 5% para 0.7 a/c.

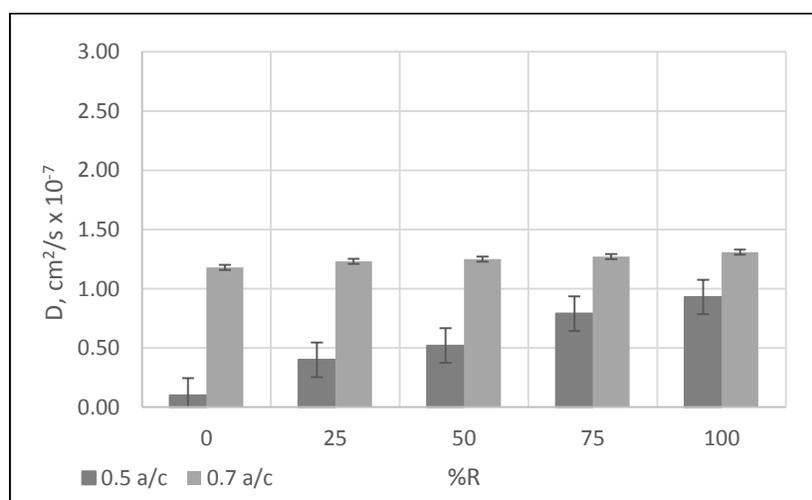


Figura 68. Difusión de cloruros en muestras sumergidas

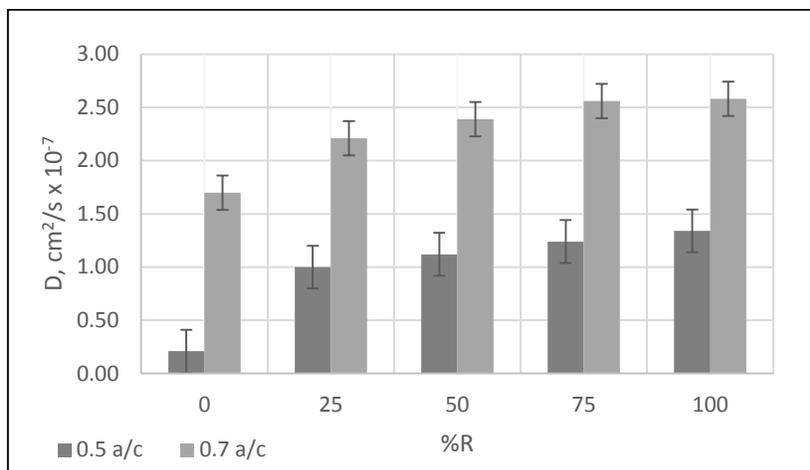


Figura 69. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura

Por su parte, las muestras de salpicadura alcanzaron mayores coeficientes de difusión, lo cual se atribuye al efecto de absorción capilar de las sales que permanecen adheridas a la superficie de concreto cuando se alcanza de nuevo la saturación de los poros.

Recientemente, Amorim et al. (2012) reportaron coeficientes de difusión entre 1.1×10^{-7} - 1.4×10^{-7} cm²/s con 0.43 a/c, donde el mejor resultado fue para 50%R, el cual estuvo por encima de los valores obtenidos en esta investigación para las mezclas con 0.5 a/c.

En una investigación independiente realizada en la FIUADY (Pacho, 2014) se ensayaron concretos puzolánicos con agregados normales, reportando coeficientes de difusión de 0.21×10^{-7} a 0.48×10^{-7} cm²/s para 0.5 a/c y de 1.8×10^{-7} para 0.7 a/c, consistentes con los obtenidos en esta investigación para 0%R.

En las Figuras 70 a 73, puede observarse la dependencia entre la difusión de cloruros y las propiedades de sorptividad y permeabilidad al aire. Los coeficientes de correlación indican una dependencia relativamente fuerte entre las variables estudiadas, sobre todo en el caso de permeabilidad al aire, donde R alcanza el valor de 0.99 en las muestras sumergidas.

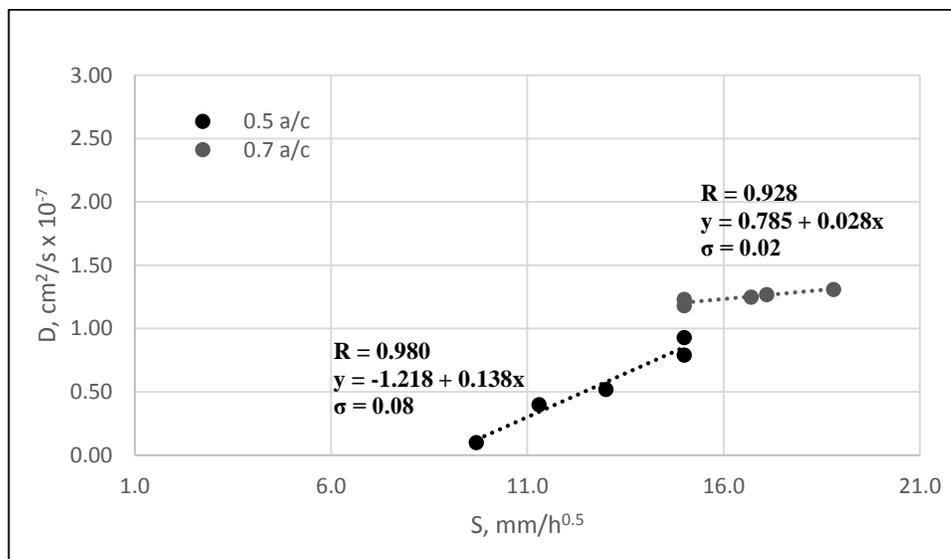


Figura 70. Difusión de cloruros en muestras sumergidas vs sorptividad

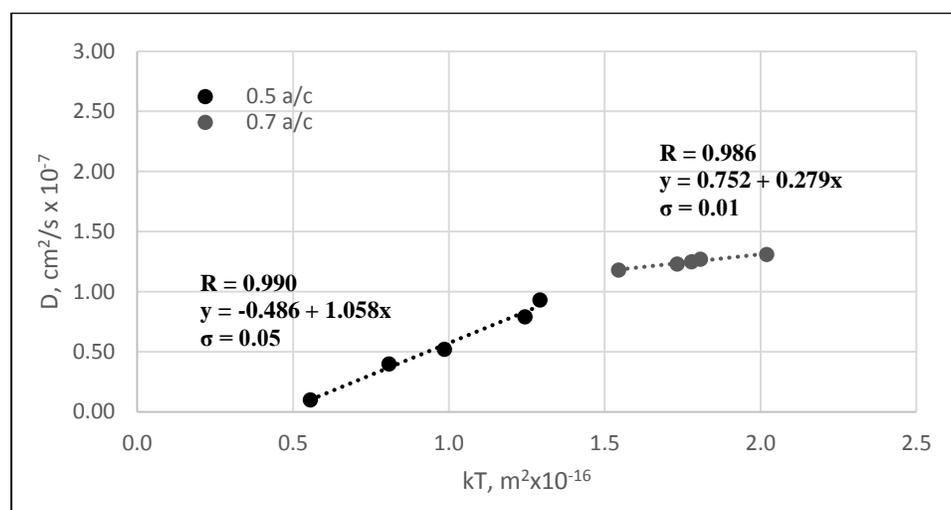


Figura 71. Difusión de cloruros en muestras sumergidas vs permeabilidad al aire

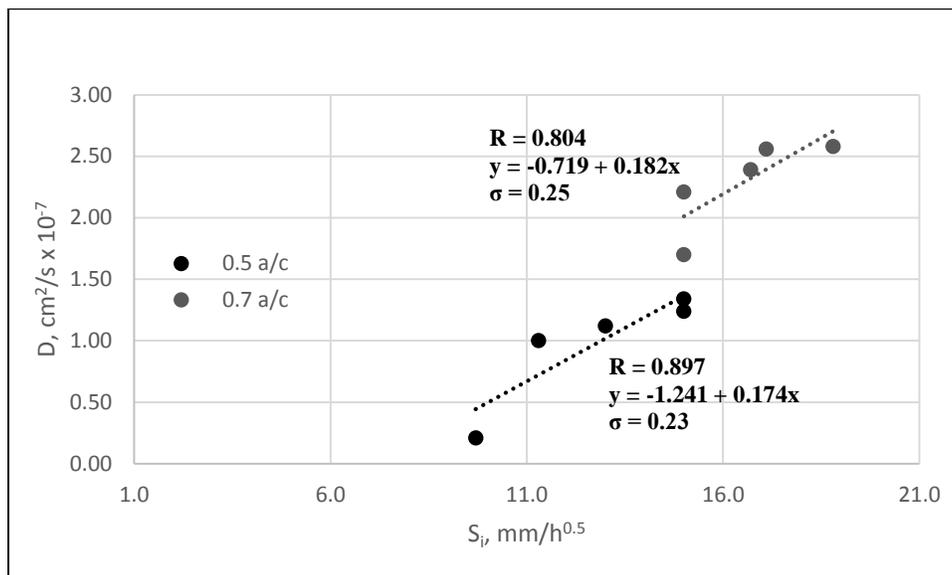


Figura 72. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura vs sorptividad

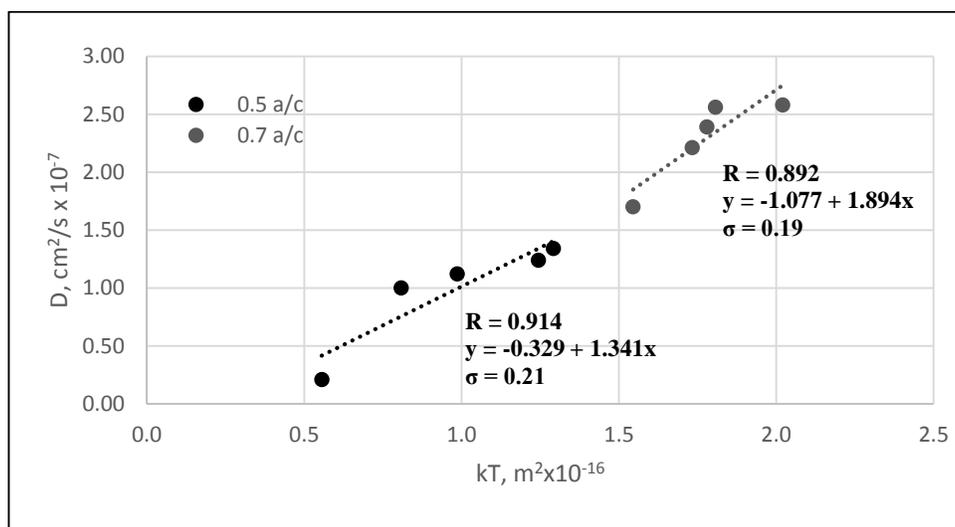


Figura 73. Difusión de cloruros en muestras de salpicadura vs permeabilidad al aire

A pesar de los altos valores de absorción, porosidad y sorptividad, reportados en esta investigación, algunas de las mezclas de concreto mostraron un

comportamiento aceptable en sus propiedades de durabilidad, por lo que nuevos límites han sido sugeridos en la Tabla 32.

Tabla 32. Nuevos índices sugeridos para calificar la porosidad y sorptividad en concretos con agregado grueso reciclado

Propiedad	Valor índice	Clase
Porosidad, %	< 15	Buena
	15-20	Moderada
	> 20	Alta
Sorptividad, mm/h ^{0.5}	< 6	Buena
	6-13	Moderada
	13-18	Pobre
	> 18	Muy pobre

En resumen, el comportamiento de los concretos en términos de durabilidad cuando se usan agregados gruesos reciclados de alta absorción, para distintos valores de %R y a/c puede ser clasificado de acuerdo con lo indicado en la Tabla 33.

Tabla 33. Indicadores de durabilidad en concretos con agregado grueso reciclado

Mezcla	a/c	%R	Porosidad	Sorptividad	Permeabilidad al aire	Resistencia a la carbonatación	Resistencia a la penetración de cloruros
CN5	0.5	0	Moderada	Moderada	Normal	Moderada	Moderada
CR25-5	0.5	25	Moderada	Moderada	Normal	Moderada	Moderada
CR50-5	0.5	50	Alta	Moderada	Normal	Moderada	Moderada
CR75-5	0.5	75	Alta	Pobre	Alta	Moderada	Pobre
CR100-5	0.5	100	Alta	Pobre	Alta	Pobre	Pobre
CN7	0.7	0	Alta	Pobre	Alta	Pobre	Pobre
CR25-7	0.7	25	Alta	Pobre	Alta	Pobre	Pobre
CR50-7	0.7	50	Alta	Pobre	Alta	Pobre	Pobre
CR75-7	0.7	75	Alta	Pobre	Alta	Pobre	Pobre
CR100-7	0.7	100	Alta	Muy pobre	Alta	Pobre	Pobre

5.9. Resultados de la evaluación de huella de carbono

La evaluación de huella de carbono por cada mezcla de concreto, expresada en kg totales de CO₂-e/m³, y su impacto en DALY se resume en la Tabla 34.

Tabla 34. Emisiones de CO₂-e/m³ por cada mezcla de concreto

<i>Mezcla</i>	<i>Cemento</i>	<i>Agregados</i>	<i>Otros</i>	<i>Parcial</i>	<i>Total</i>	<i>Impacto (DALY)</i>
CN5	305.5	44.6	0.61	45.2	350.7	7.36x10 ⁻⁰⁵
CR25-5	305.5	43.9	0.55	44.4	349.9	7.35x10 ⁻⁰⁵
CR50-5	305.5	43.1	0.49	43.6	349.0	7.33x10 ⁻⁰⁵
CR75-5	305.5	42.3	0.44	42.7	348.2	7.31x10 ⁻⁰⁵
CR100-5	305.5	41.6	0.38	42.0	347.4	7.29x10 ⁻⁰⁵
CN7	218.3	45.8	0.63	46.4	264.7	5.56x10 ⁻⁰⁵
CR25-7	218.3	45.0	0.57	45.6	263.9	5.54x10 ⁻⁰⁵
CR50-7	218.3	44.2	0.51	44.7	263.0	5.52x10 ⁻⁰⁵
CR75-7	218.3	43.5	0.46	44.0	262.2	5.51x10 ⁻⁰⁵
CR100-7	218.3	42.7	0.41	43.1	261.4	5.49x10 ⁻⁰⁵

Dicha tabla incluye los resultados totales de emisiones correspondientes a la producción de cemento, agregados y otros poco significativos como el uso de explosivos, agua y actividades como el colado y colocación del concreto.

En la columna *Parcial* se registra la suma de emisiones, excluyendo las aportaciones del cemento, toda vez que este material es el que más contribuye al total de emisiones en comparación al resto, por encima del 80% (Figura 74), similar a lo hallado por Marinković et al. (2010).

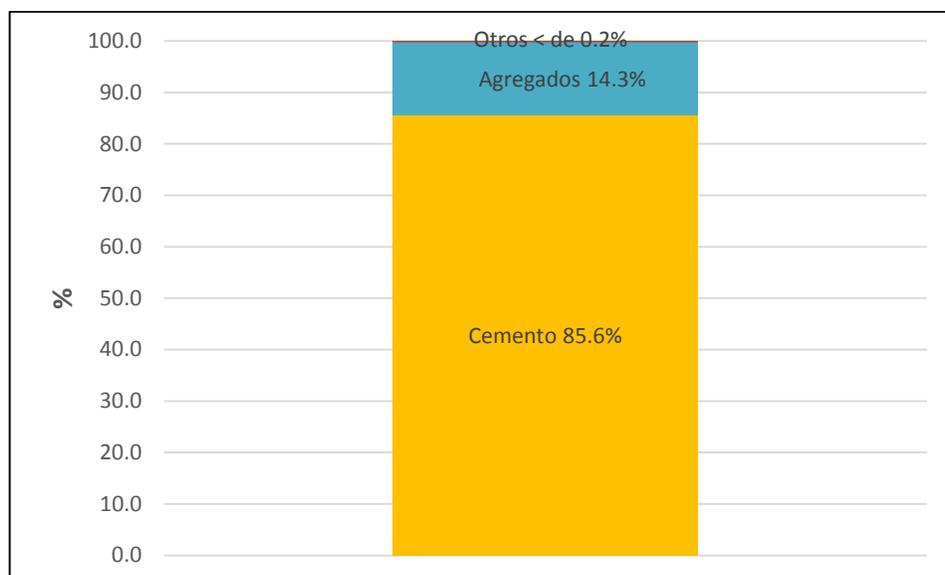


Figura 74. Aportaciones de CO₂-e por tipo de material

Por otra parte, en la Figura 75, se ha comparado la contribución de los agregados, finos y gruesos, donde se aprecia que la grava reciclada tiene un aporte ligeramente menor que la grava normal con una diferencia de 3%.

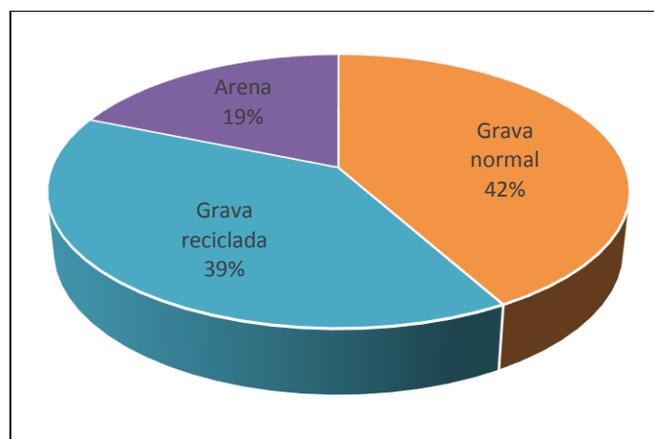


Figura 75. Aportaciones de CO₂-e por tipo de agregado

Como era de esperarse, por la diferencia en el contenido de cemento, la huella de carbono en los concretos con 0.5 a/c resultó bastante mayor en comparación a los concretos con 0.7 a/c. En cifras totales, la huella de carbono de todos los concretos estudiados fue disminuyendo marginalmente en la medida que aumentó el %R del

agregado grueso. En el caso de los concretos con 0.5 a/c, los valores alcanzados fluctuaron entre 347 y 351 kg de CO₂-e/m³, ligeramente menor a lo reportado por Turner y Collins (2013) en condiciones parecidas (354 kg de CO₂-e/m³ para 0.6 a/c).

Debido a que la huella de carbono en sí constituye un punto de evaluación intermedia, la evaluación de los impactos se llevó a un punto final como daños a la salud humana. Se determinaron considerando que 1 kg CO₂-e representa 2.1×10^{-7} DALY (Eco-Indicador 99), lo cual se muestra en la última columna de la Tabla 32. La unidad DALY (Disability Adjusted Life Years) expresa el número de años de vida de una persona sometida a una discapacidad. En cifras, estos resultados de impacto podrían ser poco significativos de manera global, pues sería necesario normalizarlos y ponderarlos considerando otras categorías de impacto como eutrofización, acidificación y cambio de uso de suelo, lo cual queda fuera del alcance de esta investigación.

6. Conclusiones

Las conclusiones específicas del presente trabajo pueden ser asumidas con base en las hipótesis y preguntas de investigación planteadas en relación a los resultados experimentales obtenidos.

En la primera hipótesis se planteó que el concreto fabricado con agregado grueso reciclado de alta absorción, dentro de ciertos límites, sería capaz de alcanzar propiedades mecánicas y características de durabilidad similares a un concreto normal de uso estructural, en forma sustentable. Las preguntas de investigación asociadas a esta hipótesis fueron referidas a la mezcla adecuada de materiales que permite lograr condiciones de durabilidad en un concreto con agregados gruesos reciclados de alta absorción y a la diferencia en cuanto a propiedades mecánicas y características de durabilidad entre un concreto con agregados reciclados de alta absorción en comparación a un concreto con agregados normales. Se determina que la hipótesis planteada se cumple. Las conclusiones que se derivan de dicho planteamiento se enuncian a continuación:

- En forma jerarquizada, se determina que los materiales predominantes en la composición de los residuos de construcción y demolición son: concreto, mampostería y cerámica, lo cual es consistente con lo observado en otras partes del mundo.
- Se confirma que las propiedades elásticas y mecánicas del concreto disminuyen al aumentar el porcentaje de reemplazo del agregado grueso normal por agregado grueso reciclado.
- Se demuestran las limitaciones del agregado calizo de alta absorción, debido a que los concretos tuvieron un peso volumétrico inferior a 2200 kg/m^3 , y los valores de módulo de elasticidad para concretos con 0.7 a/c estuvieron muy por debajo de lo esperado.

- Se comprueba que el porcentaje de reemplazo del agregado grueso y la relación a/c tienen influencia significativa en las variables resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.
- Estadísticamente, es posible inferir un comportamiento mecánico-elástico consistente a partir del límite de 50% de reemplazo.
- A pesar de los altos valores de absorción de los agregados y porosidad de los concretos, algunas de las mezclas evidenciaron un comportamiento aceptable en sus propiedades de transporte como sorptividad y permeabilidad al aire.
- Se confirma que las propiedades de durabilidad de los concretos disminuyen al aumentar el porcentaje de reemplazo del agregado grueso normal por agregado grueso reciclado, y con incremento de la relación a/c.
- Se comprueba estadísticamente que existe una dependencia relativamente fuerte entre los indicadores carbonatación y difusión de cloruros en el concreto con las propiedades de sorptividad y permeabilidad al aire.
- Los concretos fabricados con 0.5 a/c tuvieron una buena resistencia a la penetración de CO₂ y cloruros para 0, 25 y 50%R. Después de ese límite de reemplazo el uso de concretos con agregados reciclados no es recomendable en términos de durabilidad.

En la segunda hipótesis se planteó que la emisión de bióxido de carbono equivalente en la producción de concreto con agregado grueso reciclado es menor en comparación a un concreto con agregados normales. La pregunta de investigación asociada a esta hipótesis conduce a una comparación del valor de la huella de carbono entre los diferentes tipos de concreto, con agregados normales y reciclados. En este caso, la hipótesis también se cumple, aunque la aportación de CO₂ equivalente de la grava reciclada disminuye únicamente 3%

en comparación a lo aportado por la grava normal. Las conclusiones que pueden emitirse son:

- Se comprueba que el cemento es el material que tiene mayor influencia en las emisiones de CO₂ equivalente.
- Las emisiones de CO₂ equivalente disminuyen levemente en la medida que aumenta el %R del agregado grueso en la fabricación de los concretos, lo que indica que el uso de este material, tiene poca influencia en la reducción de la huella de carbono.

En forma general, acerca del empleo de agregados reciclados para la producción de concreto con solicitaciones estructurales más allá de bases para pavimentos y rellenos, pueden identificarse algunos otros inconvenientes para su uso, además de la disminución de su calidad, tales como el bajo costo de los agregados naturales que se substituyen en comparación al costo del cemento, el mayor control que debe tenerse durante la fabricación del concreto, la falta de normas técnicas específicas en nuestro país para su producción y aplicación, y sobre todo la falta de conocimiento efectivo de sus propiedades y desconfianza del sector industrial en cuanto a su comportamiento. Si bien se ha avanzado en gran medida en el estudio de las propiedades físicas y mecánicas del material, aún queda mucho campo por investigar en cuanto a su durabilidad, más aún cuando se trata de agregados de origen calizo con alta absorción.

En esta investigación se demostró que los concretos estudiados con 0.5 y 0.7 a/c, típicos de las construcciones en la región, cumplen con los requisitos mecánicos para uso estructural; sin embargo, desde el punto de vista de durabilidad, solamente sería posible utilizar concretos con 0.5 a/c reciclando hasta un máximo de 50% del agregado grueso.

En cuanto al aspecto de huella de carbono, el empleo de agregados reciclados no tiene mucha relevancia, pues la producción de cemento es el componente que realmente está impactando en las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por tanto, en

busca de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sería muy importante considerar las aportaciones de otros materiales cementantes en un marco más amplio de estudio del análisis de ciclo de vida, más allá del proceso de fabricación, contemplando el uso y disposición final de las construcciones.

Por último, se hace mención que con este trabajo se ha contribuido al fortalecimiento de una línea de investigación sobre el uso de concretos con agregados reciclados en la región de la Península de Yucatán, esperando que sus resultados puedan contribuir al establecimiento de una normativa acorde al tipo de material disponible en la zona y a las necesidades de la población.

7. Referencias

1. Alcocer Fraga, Miguel (2014), Estudio de la permeabilidad en el concreto con agregados calizos triturados, Tesis de Maestría en Ingeniería Opción Construcción, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.
2. Amorim, Pedro, Jorge de Brito y Luis Evangelista (2012) "Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability" ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 2, pp. 195-204.
3. Andrade, Carmen (coordinador) et al., (1988) "Manual. Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras" Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Madrid, 122 pp.
4. Angulo, S. C., P. M. Carrijo, A. D. Figueredo, A. P. Chaves y V. M. John (2010) "On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete" Materials and Structures. RILEM, No. 43, pp. 519-528.
5. Angulo, S. C., Leonardo F. R. Miranda y Vanderley M. John (2002) "Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil" International Conference on Sustainable Building, Oslo, Norway.
6. ASTM C 33-08 "Standard Specification for Concrete Aggregates" American Society for Testing and Materials, U.S.A.
7. ASTM C 39-05 "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" American Society for Testing and Materials, U.S.A.

8. ASTM C 131-06 “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
9. ASTM C 138-09 “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
10. ASTM C 143-08 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”. American Society for Testing and Materials, U.S.A.
11. ASTM C 192-06 “Standard practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
12. ASTM C 231-09 “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
13. ASTM C 469-02 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
14. ASTM C 496-04 “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of concrete” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
15. ASTM C 642-06 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete” American Society for Testing and Materials, U.S.A.
16. ASTM C 1585-04 “Standard Test Method for Measurements of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-cement Concretes” American Society for Testing and Materials, U.S.A.

17. ASTM D 1141-98 "Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water". American Society for Testing and Materials, U.S.A.
18. Atlas Powder Company, APC (1987) "Explosives and Rock Blasting", E. U., 662 pp.
19. Bairagi, N., K. Ravande y V. Pareek, "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates", *Resources, Conservation and Recycling* 9 (1993): pp. 109-126.
20. BS EN 206-1-2 (2011) "Specification for Constituent Materials and Concrete" British Standard Institution, London, U. K.
21. BS 1881-122 (1983) "Method for determination of water absorption" British Standard Institution, London, U. K.
22. Butler, L., J. S. West y S. L. Tighe (2011), "The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement" Cement and Concrete Research, Vol. 41, pp. 1037-1049.
23. Buyle Bodin, F y R. Hadjieva Zaharieva (2002) "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete" Materials and Structures, RILEM, Vol. 35, pp. 504-509.
24. Carvajal, Ana, Carmen Silva, Jorge Valiente y Andrés Venegas (2004) "Medidas de potencial de corrosión en sistema de penetración acelerada de iones Cl⁻ en hormigón armado". Revista de la Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile. Vol. 3, núm. 1, pp. 1-8.
25. CEB (1998), "Strategies for testing and assessment of concrete structures affected by reinforcement corrosion", Bulletin 243, 184 pp.

26. CEMEX, S.A.B. de C.V. (2013) "Informe de Desarrollo Sustentable"
Disponible en el sitio <http://www.cemex.com/ES/DesarrolloSustentable/files>,
consultado el 12 de noviembre de 2014.
27. Cerón Cardeña, Miguel, Francisco J. Duarte y William R. Castillo (1996)
"Propiedades Físicas de los Agregados Pétreos de la Ciudad de Mérida"
Boletín Académico de la FIUADY. Universidad Autónoma de Yucatán. No.
31, pp. 27-39.
28. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE (2011)
"Estudio Integral de Sistemas de Bombeo de Agua Potable Municipal",
México, 112 pp.
29. Cua Cuevas, Roxana (2010) Desempeño en ambiente costero del concreto
elaborado a base de cemento puzolánico, Tesis de Maestría en Ingeniería
Opción Construcción, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de
Yucatán.
30. Chau, C. K., W. K. Hui, W. Y. Ng y G. Powell (2012) "Assessment of CO₂
emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different
material use options" Resources, Conservations & Recycling, No. 61, pp. 22-
34.
31. Chini, Abdol , Shiou-San Kuo y Jamshid M. Armaghani (2001) "Test of
recycled concrete aggregate in accelerated test track" Journal of Materials in
Civil Engineering. ASCE, Vol. 127, No. 6, pp. 486-492.
32. Chui, Chui Te, Hsu Tseng-Hsing y Yang Wan-Fa (2008) "Life cycle
assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements"
Resources, Conservations & Recycling, No. 52, pp. 545-556.
33. Damtoft, J. S., J. Lukasik, D. Hertfort, D. Sorrentino, E. M. Gartner (2008)
"Sustainable development and climate change initiatives" Cement and
Concrete Research, Vol. 38 pp. 115-127.

34. DIN 4226-1: 2000 "Concrete Aggregate" Deutsches Institut für normung, disponible en el sitio <http://www.din.de/cmd>, consultado el 16 de mayo de 2012.
35. Domínguez, José, E. Martínez y V. Villanueva (2004) "Hormigones reciclados: una alternativa sustentable y rentable" Revista Cemento-Hormigón, Madrid, No. 867, pp. 10-21.
36. Domínguez Lepe, J. A. y Emilio Martínez L. (2007) "Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas" Ingeniería Revista Académica de la FIUADY, Universidad Autónoma de Yucatán, No. 11, Vol. 3, pp. 43-54.
37. Domínguez, José Antonio (2008), "Plan de gestión de Residuos de Construcción y Demolición para el Estado de Quintana Roo" Proyecto FOMIX No. QROO-2005-C01-19090. Reporte Final.
38. EHE-08 (2008) "Instrucción de Hormigón Estructural" Real Decreto 1247/2008, Ministerio de la Presidencia, Madrid, España, 629 pp.
39. Etxeberria, M., E. Vázquez, A. Marí y M. Barra (2007) "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete" Cement and Concrete Research, No. 37, pp. 735-742.
40. Etxeberria, M., A. R. Marí y E. Vázquez (2007) "Recycled aggregate concrete as Structural material" Materials and Structures. RILEM, No. 40, pp. 529-541.
41. European Commission (1999) "Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts" Final Report, disponible en http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.

42. Evangelista, L. y J. de Brito (2010), "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates" Cement & Concrete Composites, No. 32, pp. 9-14.
43. Fagerlund, G. (1986) "On the Capillarity of Concrete" Nordic Concrete Research, No. 1, Oslo, Noruega, Paper No. 6.
44. Fathifazl, Abbas, Razaqpur, Isgor, Fournier y S. Foo. (2009) "New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Volumen 21 No.10 pp. 601-611.
45. FHWA (2011) "Recycled concrete aggregate" National Review, U. S., disponible en el sitio <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rca.cfm>, consultado el 27 de enero de 2014.
46. FDOT (2010) "Determining Low-Levels of Chloride in Concrete and Raw Materials", FM 5-516, Appendix C, pp. 62-71, Florida, E. U.
47. Gomes, Marco y Jorge de Brito (2009) "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance" Materials and Structures. RILEM, No. 42, pp. 663-675.
48. Gómez Soberón, José M. V. (2002) "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study" Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1301-1311.
49. González Fonteboa, Belen, Fernando Martínez Abella, Javier Eiras López y Sindy Seara Paz (2011) "Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete" Materials and Structures. RILEM, No. 44, pp. 1759-1771.
50. Hansen, Torben C. (1986) "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985". Materials and Structures (RILEM), Volumen 19, N° 111, pp. 201-246.

51. Hansen, Torben C. y Søren E. Hedegård (1984) "Properties of Recycled Aggregate Concrete as Affected by Admixtures in Original Concretes". ACI Journal, Volumen 81, N° 3, pp. 21-26
52. Hansen, Torben C. y Henrik Narud (1983) "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate". Concrete International Vol. 5, pp. 79-83.
53. HB 155-2002 (2002) "Guide to the use of recycled concrete masonry materials" CSIRO, Standards Australia.
54. Hernández, O. y C. J. Mendoza (2006) "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico" Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM, volumen 7, núm. 1, pp. 57-70.
55. Howland, J. J. y A. R. Martín (2012) "Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos" Materiales de Construcción (en línea), manuscrito aceptado, doi: 10.3989/mc.2013.04812.
56. Huete, Ricardo y Begoña Blandón (2004) "Caracterización del material obtenido por reciclado de residuos cerámicos de construcción" Tecnología y Construcción. IDEC, Universidad Central de Venezuela, volumen 20, núm. 1, pp. 9-22.
57. Instituto Nacional de Ecología, INE (2004) "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002" SEMARNAT, México, 310 pp.
58. Japanese Industrial Standard Committee (2005), disponible en el sitio <http://www.jisc.go.jp/eng>, consultado el 14 de mayo de 2012.
59. Jiménez, Luis, Eric I. Moreno, A. Pérez y C. Ortiz (2013) "Comportamiento mecánico y elástico de concreto con agregado grueso calizo de alta absorción" XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT, Cartagena, Colombia, pp. 678-684.

60. Josa, Alejandro, Antonio Aguado, Atte Heino, Ewan Byars y Arnaldo Cardim (2004) "Comparative analysis of Available life cycle inventories of cement in the EU" Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1313-1320.
61. Kathib, J. M. (2005) "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate" Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 763-769.
62. Katz, Amnon (2004) "Treatments for the improvement of Recycled Aggregate" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 16, No. 6, pp. 597-603.
63. Katz, Amnon (2003) "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete" Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 703-711.
64. Kenai, S. y F. Debieb (2011) "Characterization of the durability of recycled concretes using coarse and fine crushed bricks and concrete aggregates" Materials and Structures. RILEM, No. 44, pp. 815-824.
65. Khalaf, Fouad M. y Alan S. DeVenny (2005) "Properties of New and Recycled Clay Brick Aggregates for Use in Concrete" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 17, No. 4, pp. 456-463.
66. Knight, J. (1998) "Relative Performance of High Quality Concrete Containing Recycled Aggregates and Their Use in Construction". Proceedings of the International Conference on the Use of Recycled Concrete Aggregates. Edited by: R.K. Dhir, N.A. Henderson and M.C. Limbachiya, Thomas Telford, UK, pp. 275-286.
67. Kosmatka, Steven, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese y Jussara Tanesi (2004) "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" PCA, México, 456 pp.

68. Kou, Shi Cong, Chi Sun Poon y Miren Etxeberria (2011) "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete" Cement & Concrete Composites, No. 33, pp.286-291.
69. Lamond, Joseph F. (1998) "Diseñar para obtener durabilidad" IMCYC, disponible en el sitio <http://www.imcyc.com>, consultado el 9 de marzo de 2007.
70. Lamond, Joseph F. (2002) "Removal and reuse of hardened concrete" ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 3, pp. 300-325.
71. Levy, Salomon M. y Paulo Helene (2004) "Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development" Cement and Concrete Research, Volumen 34 (11), pp. 1975-1980.
72. Limbachiya, M. C., A. Koulouris, J. J. Roberts y A. N. Fried (2004) "Performance of recycled aggregate concrete" RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development. Editores: Y. Ohama y N. Kashino, pp. 127-136.
73. Limbachiya, M. C., T. Leelawat y R. K. Dhir (2000) "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete" Materials and Structures, RILEM, Vol. 33, pp. 574-580.
74. Linares, Douglas y Miguel Sánchez (2003) "Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada" Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, Venezuela, disponible en el sitio www.scielo.org.ve, consultado el 1 de marzo de 2008.
75. Lovato, Patricia, Edna Possan, Denise Carpena Coitinho Dal Molin, Ângela B. Masuero y José Luis D. Ribeiro (2012), "Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes" Construction and Building Materials, No. 26, pp. 437-447.

76. Malavé R. E., M. Gómez, G. Sosa, E. Anzola y A. Giménez (2006) "Evaluación de la durabilidad de bloques de tierra-cemento-sisal armado, al someterlos a la acción de iones cloruros" Materiales de Construcción. Vol. 56, núm. 284, pp. 5-16.
77. Maldonado López, Luis, José A. González Fajardo y Luz María González Rodríguez (1999) "Estudio sobre la penetración de cloruros en el concreto" Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán, volumen 3, No. 2, pp. 27-40
78. Marincović, S., V. Radonjanin, M. Malašev, I. Ignjatović (2010) "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete" Waste Management, Vol. 30, pp. 2255-2264.
79. Martínez, I. E. y C. J. Mendoza (2006). "Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados" Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM, No. 3, pp. 151-164.
80. Mellmann, G. (1999), "Processed concrete rubble for the reuse as aggregate" Proceedings of international seminar on exploiting waste in concrete, pp. 171-178, Dundee, Scotland.
81. Meyer, C. (2009) "The greening of the concrete industry" Cement & concrete Composites, No. 31, pp. 601-605.
82. Mena Ferrer, Manuel (2005) "Durabilidad de estructuras de concreto en México. Previsiones y recomendaciones" IMCYC, México, 139 pp.
83. Montgomery, D. C. (2011) "Diseño y análisis de experimentos" Limusa Wiley, México, 686 pp.
84. Moreno, E. I. (1999), Carbonation of blended cement concretes, Ph. D. dissertation, University of South Florida.

85. Moreno, Eric y Alberto Sagüés (1996) "Performance of alternative material rebar" Final Report. University of South Florida, 44 pp.
86. Moreno, Eric, Gerardo Domínguez, Enrique Cob Sarabia y Francisco Duarte Gómez (2004) "Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración" Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán, volumen 8, núm. 2, pp. 117-130.
87. Moreno, Eric I. (2013) "Carbonation Coefficients from Concrete Made with High-Absorption Limestone Aggregate" Advances in Materials Science and Engineering (en línea): <http://dx.doi.org/10.1155/2013/734031>.
88. Müller, Annette (2006) "Recycling of construction and demolition waste-status and new utilization methods" Committee on data for science and technology, Beijing, disponible en el sitio <http://www.codata.org/>, consultado el 16 de febrero de 2012.
89. Müller, C. (1998) "Requirements on concrete for future recycling" International Symposium Sustainable Construction: Concrete with Recycled Aggregates, University of Dundee, disponible en el sitio <http://www.b-i-m.de/public/artikels.asp>, consultado el 27 de agosto de 2012.
90. Nataatmadja, A. y L. Tan (2001) "Resilient response of recycled concrete road aggregates" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 450-453.
91. Nealen, Andrew y Marcus Rühl (1997) "Consistency aspects in the production of concrete using aggregates from recycled demolition material" Darmstadt Concrete 97, disponible en el sitio <http://www.b-i-m.de/public/artikels.asp>, consultado el 27 de agosto de 2012.
92. Neville, A.M. y J. J. Brooks (2010), Tecnología del Concreto, Trillas, México, 329 pp.

93. NFP 18-301 (1983), "Bordures et caniveaux en pierre naturelle ou en béton et dispositifs de retenue en béton" GPEMT, Fascicule 31, París, Fr., 87 pp.
94. Norma Mexicana NMX C-159-ONNCCE-1999, Industria de la construcción- Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio.
95. Norma Mexicana NMX C-163-1997-ONNCCE, Industria de la construcción- Concreto-Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.
96. Norma Mexicana NMX C-403-ONNCCE-1999, Industria de la construcción- Concreto hidráulico para uso estructural, apéndice A.
97. Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto. RCDF (2004), Gaceta Oficial del Distrito Federal, pp. 124-128.
98. Oikonomou, Nik D. (2005) "Recycled concrete aggregates" Cement & Concrete Composites, No. 27, pp. 315-318.
99. Öko-Institut (2013) "Approximated EU GHG Inventory: Proxy GHG emission estimates for 2013, EEA Technical Report, No. 16, 251 pp.
100. Olorunsogo, F. T. y N. Padayachee (2002) "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes" Cement and Concrete Research, No. 32, pp. 179-185.
101. Otzuki, Nobuaki, Shin-ichi Miyazato y Wanchai Yodsudjai (2003). "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete" Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, volumen 15, No. 5, pp. 443-451.
102. Pacheco, Jorge y Lauro A. Alonzo (2003) "Caracterización del material calizo de la Formación Carrillo Puerto en Yucatán" Ingeniería: Revista

Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán, volumen 7, No. 1, pp. 7-19.

103. Pacho Monforte, Julio César (2014), Desempeño a mediano plazo de dos alternativas de protección al concreto contra el efecto del cloruro en un ambiente marino, Tesis de maestría en Ingeniería Opción Construcción, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.
104. Papadakis, Vagelis G., Costas G. Vayenas y Michael N. Fardis (1991) "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation" ACI Materials Journal, Vol. 88, No.4, pp. 363-373.
105. Pérez, I., M. Toledo, J. Gallego y J. Taibo (2007) "Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición" Materiales de Construcción. Vol. 57, No. 285, pp. 17-29.
106. Poon, C. S., Z. H. Shui, S. Lam, H. Fok, y S. C. Kou (2004) "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete" Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 31-36.
107. Rao, M. Chakradhara, S. K. Bhattacharyya y S. V. Barai (2011) "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete" Materials and Structures, RILEM, No. 44, pp. 205-220.
108. Red DURAR (2000), "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", CYTED, Subprograma XV, Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, 208 pp.
109. Reglamento de las Construcciones de Concreto Reforzado (ACI-318-83) y Comentarios (1984), México, IMCYC, 595 pp.

110. RILEM (1994) "Specifications for concrete with Recycled Aggregates" *Materials and Structures*, No. 27, pp. 547-559.
111. RILEM (1988), "Measurements of hardened concrete carbonation depth", *Materials and Structures*, CPC-18, Vol. 21 pp. 453-455.
112. Rolón Aguilar, J. C., D. Nieves Mendoza, R. Huete Fuertes, B. Blandón González, A. Terán Gilmore, y R. Pichardo Ramírez (2007) "Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón" *Materiales de Construcción*, Vol. 57, No. 288, pp. 5-15.
113. Rühl, Marcus (1997) "Water absorption capacity of recycled demolition rubbish" *Darmstadt Concrete 97*, disponible en el sitio <http://www.b-i-m.de/public/artikels.asp>, consultado el 27 de agosto de 2012.
114. Sagoe-Crentsil, K. K., T. Brown y A. H. Taylor (2001) "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate" *Cement and Concrete Research*, No. 31, pp. 707-712.
115. Sánchez de Juan, Marta (2004), Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
116. Sánchez de Juan, Marta y Pilar Alaejos Gutiérrez (2009) "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate" *Construction and Building Materials*, No. 23 pp. 872-877.
117. San Juan, M. A., C. Andrade y M. Cheyrezy (2003) "Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions" *Advances in Cement Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 171-180.
118. SIA 262/1-E: 2003 "Concrete Structures" Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, pp. 30-331.

119. SBM Mining and Construction Machinery (2012), Trituradoras, disponible en el sitio <http://www.sbmtrituradora.cl/>, consultado el 27 de agosto de 2012.
120. Solís Carcaño, Rómel y Eric I. Moreno (2006) “Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo” Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 21, No. 3, pp. 57-68.
121. Solís Carcaño, Rómel y Eric I. Moreno (2008) “Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity” Construction and Building Materials, No. 22, pp. 1225-1231.
122. Tam, Vivian W. Y. y C. M. Tam (2007) “Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two- stage mixing approach”, Journal of Materials Science, Volumen 42, pp. 3592-3602.
123. Tassew, Samson y Adam S. Lubell (2011) “Mechanical properties of lightweight ceramic concrete” Materials and Structures. RILEM, No. 45, pp. 561-574.
124. Tavakoli, Mostafa y Parviz Soroushian (1996) “Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate” ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 2, pp. 182-190.
125. Topçu, İlker Bekir y Selim Şengel (2004) “Properties of concretes produced with waste concrete aggregate” Cement and Concrete Research, No. 34 pp. 1307-1312.
126. Torrent, R. J. (1999) “Un método rápido y no destructivo para medir la permeabilidad al aire del hormigón” Materiales de Construcción, Vol. 49, No. 254, pp. 51-56.
127. Torrent, R. y G. Frenzer (1995) A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp. 985-992.

128. Torrent, R., E. Denarié, F. Jacobs, A. Leemann y T. Teruzzi (2012) "Specification and site control of the permeability of the cover concrete: The Swiss approach", *Materials and Corrosion*, vol. 63, No. 12, pp. 1127-1133.
129. Triturados y Carpetas del Sureste S.A. de C. V., TRICASU (2014), *Bitácora de operación industrial*, primer semestre de 2014, México.
130. Turner, Louise K. y Frank G. Collins (2013) "Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete" *Construction and Building Materials*, No. 43, pp. 125-130.
131. UNE 7238:1971, "Determinación del coeficiente de forma el árido grueso empleado en la fabricación de hormigones" Comité AEN/CTN 146-Áridos, Madrid, España.
132. U. S. Department of Transportation (2013) Federal Highway Administration National Review. Pavements. Recycled Concrete Aggregate. Disponible en el sitio <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rca.cfm>.
133. Van den Heede, P. y N. De Belie (2012) "Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations" *Cement & Concrete Composites*, No. 34, pp. 431-442.
134. Villagrán, Yuri, Claudio Zega y Ángel Di Maio (2008) "Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete" *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 20, No. 6, pp. 449-455.
135. Villagrán Zaccardi, Y. A., C. J. Zega y A. A. Di Maio (2012) "Influencia del ion sulfato en la retención de cloruro en hormigón reciclado con aire incorporado" VIII Congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras, CINPAR, Vol. 3 No. 4, La Plata, Argentina.

136. Wiedmann, Thomas y Jan Minx (2007) "A definition of Carbon Footprint" ISA^{UK} Research Report 07-01, Durham, U. K.
137. Xiao, Jianzhuang, Li Wengui, Fan Yuhui y Huang Xiao (2012) "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). Construction and Building Materials, No. 31, pp. 364-383.
138. Xiao, Jianzhuang, Li Jiabin, Fan Yuhui y Ch. Zhang (2005) "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading" Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1187-1194.
139. Zaharieva, Roumiana, Françoise Buyle-Bodin, Frédéric Skoczylas y Eric Wirquin (2003) "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete" Cement & Concrete Composites, No. 25, pp. 223-232.
140. Zega, C. J., Y. A. Villagrán Zaccardi y A. A. Di Maio (2010) "Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates, Materials and Structures. RILEM, No. 43, pp. 195-202.
141. Zellmer, David (1997) "Gran's Plotting for End Point Detection" California State University. Disponible en <http://zimmer.csufresno.edu/>, consultado el 17 de Agosto de 2013.

8. APÉNDICES

Apéndice 1. Propiedades índices de los agregados

Peso volumétrico seco y suelto (PVSS) de la grava

Muestra	Peso, kg	
	G. N.	G. R.
1	8.693	7.823
2	8.183	7.773
3	8.443	7.913
\bar{X}	8.440	7.836

Grava normal (G. N.)

$$PVSS = 8.440 \times 140.6 = 1187 \text{ kg/m}^3$$

Grava reciclada (G. R.)

$$PVSS = 7.836 \times 140.6 = 1102 \text{ kg/m}^3$$

Peso volumétrico seco compacto (PVSC) de la grava

Muestra	Peso, kg	
	G. N.	G. R.
1	9.923	9.003
2	9.843	8.523
3	10.123	8.815
\bar{X}	9.963	8.780

Grava normal (G. N.)

$$PVSC = 9.963 \times 140.6 = 1401 \text{ kg/m}^3$$

Grava reciclada (G. R.)

$$PVSC = 8.780 \times 140.6 = 1235 \text{ kg/m}^3$$

Gravedad específica (G. E.) y absorción de la grava normal

Muestra	P. Sum, kg	PSSS, kg	G. E.	P. Seco, kg	Absorción, %
1	1.725	3	2.35	2.828	6.08
2	1.7	3	2.31	2.788	7.60
3	1.72	3	2.34	2.823	6.27
\bar{X}			2.33		6.65

Gravedad específica (G. E.) y absorción de la grava reciclada

<i>Muestra</i>	<i>P. Sum, kg</i>	<i>PSSS, kg</i>	<i>G.E.</i>	<i>P. Seco, kg</i>	<i>Absorción, %</i>
1	1.713	3.000	2.33	2.808	6.84
2	1.699	3.000	2.31	2.793	7.41
3	1.697	3.000	2.30	2.793	7.41
\bar{X}			2.31		7.22

Desgaste de la grava normal (Máquina de los ángeles)

<i>Muestra</i>	<i>Peso, kg</i>	<i>Peso desgastado, kg</i>
1	5.0	3.6
2	5.0	3.6
\bar{X}	5.0	3.6
% desgaste		28

Desgaste de la grava reciclada (Máquina de los ángeles)

<i>Muestra</i>	<i>Peso, kg</i>	<i>Peso desgastado, kg</i>
1	5.0	3.51
2	5.0	3.45
\bar{X}	5.0	3.48
% desgaste		30

Granulometría de la grava normal

<i>Malla</i>	<i>P. Retenido kg</i>	<i>P. Pasa kg</i>	<i>%Pasa</i>
1"	0	10	100
¾"	0.283	9.717	97
½"	3.908	5.809	58
3/8"	3.063	2.746	27
#4	1.946	0.8	8
#8	0.283	0.517	5

Granulometría de la grava reciclada

<i>Malla</i>	<i>P. Retenido kg</i>	<i>P. Pasa kg</i>	<i>%Pasa</i>
1"	0.05	9.95	100
¾"	0.798	9.152	92
½"	5.726	3.426	34
3/8"	2.338	1.088	11
#4	0.956	0.132	1
#8	0.062	0.07	1

Peso volumétrico seco y suelto (PVSS) de la arena

<i>Muestra</i>	<i>Peso, kg</i>
1	3.235
2	3.185
3	3.225
\bar{X}	3.215

$$PVSS = 3.215 \times 356.32 = 1146 \text{ kg/m}^3$$

Absorción de la arena

<i>Muestra</i>	<i>Peso húmedo g</i>	<i>Peso seco g</i>	<i>% Absorción</i>
1	500	468	6.84
2	320	303	5.61
\bar{X}			6.2

Gravedad específica (G. E.) de la arena

<i>Muestra</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>G. E.</i>
1	300	757	930	2.36
2	300	840	1015	2.40
\bar{X}				2.38

$$G. E. = \frac{D}{D - (B + C)}$$

D, peso seco en g

B, peso del recipiente con la muestra y agua en g

C, peso del recipiente lleno de agua en g

Granulometría de la arena

<i>Malla #</i>	<i>P. Retenido</i>	<i>% Retenido</i>	<i>Acumulado</i>	<i>% Pasa</i>
4	0	0	0	100
8	13.9	2.78	2.78	97
16	111.5	22.3	25.08	75
30	130.6	26.12	51.2	49
50	93	18.6	69.8	30
100	117.3	23.46	93.26	7
Suma	466.3	93.3	242.12	

Módulo de finura: 2.4

Apéndice 2. Dosificación de mezclas de concreto

Método: ACI
 Relación a/c: 0.5
 Revenimiento: 10 cm
 Aire atrapado: 2%
 Agua para saturar: 80% de absorción
 Tamaño máximo de agregado: 3/4"

Cantidades relativas sin corrección, kg/m³

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua	205.0	205.0	205.0	205.0	205.0
Cemento	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0
Grava normal	986.6	718.9	465.2	225.6	0
Grava reciclada	0	239.6	465.2	676.7	873.8
Arena	526.9	555.6	580.3	609.1	634.5

Cantidades relativas corregidas por humedad, kg/m³

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua de mezclado	279.2	280.0	280.5	281.3	281.6
Agua absorbida	74.2	75.0	75.5	76.3	76.6
Cemento	410.0	410.0	410.0	410.0	410.0
Grava normal	924.7	673.0	434.9	210.6	0
Grava reciclada	0	224.3	434.9	631.9	815.1
Arena	496.2	523.2	546.5	573.5	597.4

Cantidades relativas por amasada de 120 litros, kg

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua	33.5	33.6	33.7	33.8	33.8
Cemento	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2
Grava normal	111.0	80.8	52.2	25.3	0
Grava reciclada	0	26.9	52.2	75.8	97.8
Arena	59.5	62.8	65.6	68.8	71.7

Nota.

La cantidad de agua absorbida se obtiene de la diferencia entre el agua de mezclado y la cantidad de agua antes de corregir.

Método: ACI
 Relación a/c: 0.7
 Revenimiento: 10 cm
 Aire atrapado: 2%
 Agua para saturar: 80% de absorción
 Tamaño máximo de agregado: 3/4"

Cantidades relativas sin corrección, kg/m³

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua	205.0	205.0	205.0	205.0	205.0
Cemento	293.0	293.0	293.0	293.0	293.0
Grava normal	986.6	634.3	465.2	225.6	0
Grava reciclada	0	211.4	465.2	676.7	873.8
Arena	615.4	644.1	668.8	697.6	723.0

Cantidades relativas corregidas por humedad, kg/m³

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua de mezclado	283.3	284.1	284.6	285.4	285.7
Agua absorbida	78.3	79.1	79.6	80.4	80.7
Cemento	293.0	293.0	293.0	293.0	293.0
Grava normal	924.7	673.0	434.9	210.6	0
Grava reciclada	0	224.3	434.9	631.7	815.1
Arena	579.5	606.5	629.8	656.9	680.8

Cantidades relativas por amasada de 120 litros, kg

Materiales	% de Reemplazo de agregado grueso				
	0	25	50	75	100
Agua	34.0	34.1	34.2	34.3	34.3
Cemento	35.1	35.1	35.1	35.1	35.1
Grava normal	111.0	80.8	52.2	25.3	0
Grava reciclada	0	26.9	52.2	75.8	97.8
Arena	69.5	72.8	75.6	78.8	81.7

Nota.

La cantidad de agua absorbida se obtiene de la diferencia entre el agua de mezclado y la cantidad de agua antes de corregir.

Apéndice 3. Porosidad, densidad y absorción de los concretos

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CN5	6	3340.5	3053.0	3346.5	1784.0	18.78	1.96	9.42
	3	3325.5	3030.5	3325.5	1768.0	18.94	1.95	9.73
	5	3371.5	3059.0	3368.5	1791.0	19.62	1.94	10.22
	1	3323.0	3040.5	3316.0	1756.0	17.66	1.94	9.29
	9	3321.5	3054.0	3320.5	1764.0	17.12	1.96	8.76
\bar{X}						18.43	1.95	9.48
σ						0.91	0.01	0.48

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR25-5	1	3498.0	3053.0	3516.0	1899.0	27.83	1.91	14.58
	3	3317.0	3041.0	3326.0	1784.0	18.00	1.98	9.08
	5	3322.0	3048.5	3345.0	1796.0	17.92	2.00	8.97
	6	3344.0	3033.5	3360.0	1814.0	20.29	1.98	10.24
	8	3330.0	3022.5	3351.0	1809.0	20.22	1.99	10.17
\bar{X}						20.85	1.97	10.61
σ						3.64	0.03	2.05

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR50-5	2	3379.0	3031.5	3323.0	1773.0	21.64	1.89	11.46
	3	3400.5	3030.5	3335.0	1781.0	22.85	1.87	12.21
	4	3385.0	3028.0	3322.0	1764.0	22.02	1.87	11.79
	5	3402.5	3038.5	3327.0	1768.0	22.27	1.86	11.98
\bar{X}						22.19	1.87	11.86
σ						0.44	0.01	0.27

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR75-5	1	3397.0	3015.5	3346.0	1786.0	23.68	1.87	12.65
	2	3377.0	3011.5	3335.5	1774.0	22.80	1.88	12.14
	3	3370.0	3009.5	3336.5	1775.0	22.60	1.89	11.98
	4	3383.0	3012.0	3347.5	1789.0	23.27	1.89	12.32
	5	3385.0	3014.0	3341.5	1784.0	23.17	1.88	12.31
\bar{X}						23.11	1.88	12.28
σ						0.38	0.01	0.22

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR100-5	1	3403.5	3021.5	3359.5	1794.0	23.73	1.88	12.64
	2	3390.5	3013.0	3342.0	1779.0	23.43	1.87	12.53
	3	3409.5	3023.5	3366.5	1794.0	23.89	1.87	12.77
	4	3410.5	3035.5	3368.0	1799.0	23.27	1.88	12.35
	5	3396.0	3024.0	3351.0	1784.0	23.08	1.88	12.30
\bar{X}						23.48	1.88	12.52
σ						0.30	0.01	0.17

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CN7	1	3353.5	3007.0	3308.0	1757.0	21.70	1.88	11.52
	2	3340.0	2963.5	3314.0	1762.0	23.86	1.88	12.70
	6	3340.0	2950.0	3287.0	1739.0	24.36	1.84	13.22
	7	3340.5	2957.0	3295.0	1749.0	24.10	1.86	12.97
	9	3509.5	3105.0	3449.0	1830.0	24.08	1.85	13.03
\bar{X}						23.62	1.86	12.69
σ						0.97	0.02	0.61

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR25-7	1	3371.0	2970.5	3319.5	1766.0	24.95	1.85	13.48
	3	3378.5	2985.5	3324.5	1769.0	24.42	1.85	13.16
	4	3374.0	2979	3319.0	1769.0	24.61	1.86	13.26
	5	3371.0	2985.5	3320.0	1759.0	23.91	1.85	12.91
\bar{X}						24.47	1.85	13.20
σ						0.38	0.01	0.20

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR50-7	1	3356.0	2945.0	3300.0	1743.0	25.48	1.83	13.96
	2	3361.0	2958.5	3306.5	1744.0	24.89	1.83	13.60
	3	3358.5	2941.0	3305.0	1741.0	25.81	1.82	14.20
	4	3346.5	2938.0	3286.0	1724.0	25.18	1.81	13.90
	5	3378.0	2989.0	3322.5	1755.0	23.97	1.84	13.01
\bar{X}						25.07	1.83	13.73
σ						0.63	0.01	0.41

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR75-7	1	3376.5	2971.5	3324.0	1771.0	25.23	1.85	13.63
	6	3343.5	2940.0	3275.5	1724.0	24.92	1.82	13.72
	7	3368.5	2951.0	3296.0	1741.0	25.65	1.81	14.15
	8	3380.0	2964.5	3329.0	1773.0	25.86	1.84	14.02
	9	3341.5	2922.0	3276.5	1728.0	26.00	1.81	14.36
\bar{X}						25.53	1.83	13.97
σ						0.40	0.02	0.27

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Peso saturado g</i>	<i>Peso seco al horno g</i>	<i>Peso hervido g</i>	<i>Peso sumergido g</i>	<i>Porosidad %</i>	<i>Densidad Aparente</i>	<i>Absorción %</i>
CR100-7	2	3312.0	2906.0	3278.0	1734.0	25.73	1.84	13.97
	4	3310.0	2905.5	3277.0	1734.0	25.67	1.84	13.92
	5	3301.0	2900.5	3294.0	1744.0	25.72	1.86	13.81
	8	3311.0	2919.0	3266.0	1719.0	24.62	1.83	13.43
	9	3326.0	2906.0	3292.0	1744.0	26.55	1.84	14.45
\bar{X}						25.66	1.84	13.92
σ						0.61	0.01	0.33

Apéndice 4. Resistencia a la compresión

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Diámetro cm</i>	<i>Área cm²</i>	<i>Carga de ruptura kg</i>	<i>Resistencia a la compresión kg/cm²</i>	
CN5	12	14.8	172.03	57500	334	
	7	14.8	172.03	59500	346	
	8	15.0	176.71	57500	325	
	1	15.0	176.71	57525	326	
	4	15.0	176.71	58000	328	
					\bar{X}	332
					σ	7.71
CR25-5	2	15.1	179.08	55500	310	
	5	15.0	176.71	58500	331	
	6	15.1	179.08	56500	316	
	8	15.0	176.71	57500	325	
	11	14.9	174.37	57500	330	
					\bar{X}	322
					σ	8.26
CR50-5	3	14.9	174.60	55000	315	
	5	15.1	179.08	57000	318	
	8	14.9	174.37	53500	307	
	10	14.9	174.37	55250	317	
	12	15.0	176.71	55750	315	
					\bar{X}	314
					σ	4.00
CR75-5	1	14.9	174.37	55000	315	
	2	14.9	174.37	51500	295	
	4	15.1	179.08	57500	321	
	7	15.1	179.08	52500	293	
	9	15.2	181.46	53500	295	
					\bar{X}	304
					σ	11.82
CR100-5	13	15.1	179.08	55000	307	
	15	15.6	191.13	56500	296	
	9	15.4	186.27	55500	298	
	11	15.5	188.69	56750	301	
	3	14.9	174.37	55250	317	
					\bar{X}	304
					σ	7.64

<i>Mezcla</i>	<i>Número de espécimen</i>	<i>Diámetro cm</i>	<i>Área cm²</i>	<i>Carga de ruptura kg</i>	<i>Resistencia a la compresión kg/cm²</i>	
CN7	7	15.0	176.71	43500	246	
	14	15.2	181.46	43000	237	
	5	15.1	179.08	44000	246	
	1	15.1	179.08	43500	243	
	10	15.1	179.08	42500	237	
					\bar{X}	242
					σ	3.97
CR25-7	6	15.0	176.71	42000	238	
	1	15.1	179.08	42500	237	
	3	15.1	179.08	42000	235	
	8	15.1	179.08	41500	232	
	10	14.9	174.37	41500	238	
					\bar{X}	236
					σ	2.40
CR50-7	12	14.9	174.37	40000	229	
	7	15.0	176.71	40000	226	
	11	15.0	176.71	41500	235	
	8	15.0	176.71	41500	235	
	10	15.1	179.08	41000	229	
					\bar{X}	231
					σ	3.40
CR75-7	1	14.9	174.37	38000	218	
	6	15.1	179.08	37500	209	
	2	14.9	174.37	39000	224	
	5	15.1	179.08	37000	207	
	8	15.2	181.46	38500	212	
					\bar{X}	214
					σ	6.13
CR100-7	13	14.9	174.37	35750	205	
	1	14.9	174.37	33750	194	
	2	14.8	172.03	33250	193	
	5	14.9	174.37	33000	189	
	14	15.2	181.46	34250	189	
					\bar{X}	194
					σ	5.87

Apéndice 5. Módulo de elasticidad

Mezcla	Número de espécimen	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación mm	Módulo de elasticidad kg/cm ²
CN5	1	23554	132.74	0.086	206332
	4	23039	132.74	0.087	201322
	5	22967	132.74	0.088	207951
				\bar{X}	205202
				σ	2822.0
CR25-5	5	22356	128.93	0.083	198035
	6	22350	128.93	0.087	189569
	8	22974	128.93	0.074	182966
				\bar{X}	190190
				σ	6167.6
CR50-5	7	21856	125.80	0.100	174164
	9	23398	125.80	0.097	168765
	11	22309	125.80	0.098	174912
				\bar{X}	172614
				σ	2738.3
CR75-5	1	20983	121.59	0.096	160138
	3	21735	121.59	0.095	168361
	7	21745	121.59	0.096	163927
				\bar{X}	164142
				σ	3360.7
CR100-5	5	21612	121.46	0.107	157024
	13	20941	121.46	0.108	161015
	15	20975	121.46	0.108	141263
				\bar{X}	153101
				σ	8527.3

Mezcla	Número de espécimen	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación mm	Módulo de elasticidad kg/cm ²
CN7	4	16674	96.72	0.064	173042
	10	17237	96.72	0.073	142565
	11	17190	96.72	0.073	170207
				\bar{X}	161938
				σ	13747.7
CR25-7	3	16774	94.34	0.100	114228
	4	16222	94.34	0.086	112306
	8	16760	94.34	0.091	105721
				\bar{X}	110752
				σ	3642.8
CR50-7	1	15933	92.35	0.110	107294
	4	16429	92.35	0.102	113050
	13	16451	92.35	0.102	113032
				\bar{X}	111125
				σ	2709.2
CR75-7	4	15272	85.58	0.091	113124
	5	14750	85.58	0.092	110786
	7	15482	85.88	0.093	104664
				\bar{X}	109524
				σ	3567.1
CR100-7	4	13851	77.59	0.091	91583
	8	13360	77.59	0.097	95502
	13	13324	77.59	0.069	94007
				\bar{X}	93697
				σ	1614.7

Apéndice 6. Permeabilidad al aire

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CN5	5	1	36	0.548	0.379
		2	37	0.524	
		3	36	0.324	
	3	1	36	0.548	0.363
		2	36	0.342	
		3	36	0.444	
	4	1	35	0.723	0.628
		2	35	0.847	
		3	36	0.740	
				\bar{X}	0.457
				σ	0.121

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR25-5	1	1	36	1.176	0.812
		2	35	1.134	
		3	34	1.068	
	2	1	34	1.112	0.776
		2	37	1.135	
		3	35	0.983	
	3	1	36	1.230	0.837
		2	37	1.227	
		3	35	1.026	
				\bar{X}	0.809
				σ	0.025

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR50-5	2	1	35	1.764	1.127
		2	35	1.739	
		3	36	1.501	
	1	1	34	1.245	0.819
		2	35	1.213	
		3	34	1.179	
	3	1	35	1.387	1.012
		2	35	1.582	
		3	33	1.523	
				\bar{X}	0.986
				σ	0.127

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR75-5	4	1	37	1.591	1.252
		2	39	1.857	
		3	35	2.336	
	6	1	35	1.584	0.918
		2	35	1.379	
		3	34	1.278	
	3	1	36	1.923	1.235
		2	38	1.800	
		3	36	1.984	
				\bar{X}	1.135
				σ	0.154

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR100-5	3	1	34	2.304	1.248
		2	33	2.268	
		3	35	1.292	
	1	1	40	2.250	1.463
		2	37	2.767	
		3	35	1.858	
	2	1	34	1.572	1.070
		2	34	1.502	
		3	35	1.954	
				\bar{X}	1.260
				σ	0.161

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CN7	5	1	38	2.106	1.442
		2	37	2.165	
		3	35	2.535	
	1	1	34	2.411	1.472
		2	39	2.162	
		3	40	2.377	
	4	1	39	2.134	1.298
		2	36	2.395	
		3	36	1.597	
				\bar{X}	1.404
				σ	0.076

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR25-7	1	1	41	2.849	1.665
		2	38	2.804	
		3	37	2.505	
	2	1	40	3.366	1.873
		2	38	3.180	
		3	36	2.632	
	3	1	40	2.643	1.661
		2	40	2.713	
		3	39	2.784	
				\bar{X}	1.733
				σ	0.099

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR50-7	1	1	41	3.178	1.915
		2	41	3.239	
		3	41	3.194	
	5	1	38	3.014	1.705
		2	36	2.545	
		3	38	3.002	
	3	1	39	3.135	1.718
		2	34	2.335	
		3	42	3.153	
				\bar{X}	1.779
				σ	0.096

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR75-7	5	1	39	3.229	1.979
		2	41	3.612	
		3	37	3.253	
	4	1	38	3.161	1.747
		2	36	2.941	
		3	37	2.810	
	2	1	39	3.080	1.694
		2	39	2.705	
		3	36	2.854	
				\bar{X}	1.807
				σ	0.124

Concreto	Número de espécimen	Ensayo	P_i , mbar	$K_t \times 10^{-16} m^2$	
				Medida	ajustada
CR100-7	1	1	43	3.662	2.109
		2	43	3.983	
		3	43	3.193	
	2	1	41	3.077	1.943
		2	42	3.726	
		3	41	3.182	
	3	1	41	3.055	2.008
		2	40	3.330	
		3	43	3.937	
				\bar{X}	2.020
				σ	0.068

Apéndice 7. Absorción Capilar

Cálculo de absorción capilar en concretos con a/c = 0.5

Día	T	T ^{1/2}	CR75-5			CR25-5			CR50-5			CR100-5			CN5		
			M	D	I	M	D	I	M	D	I	M	D	I	M	D	I
1	0	0	798.5	0	0.0000	801.0	0	0.0000	800.0	0	0.0000	798.5	0	0.0000	809.0	0	0
1	60	7.7	805.5	7.0	0.9002	804.0	3.0	0.3808	807.5	7.5	0.9588	804.0	5.5	0.7010	811.5	2.5	0.3189
1	300	17.3	809.0	10.5	1.3504	806.5	5.5	0.6980	809.0	9.0	1.1505	810.5	12.0	1.5294	813.5	4.5	0.5741
1	600	24.5	814.5	16.0	2.0577	808.5	7.5	0.9519	812.5	12.5	1.5979	816.5	18.0	2.2941	814.0	5.0	0.6379
1	1200	34.6	819.5	21.0	2.7007	811.5	10.5	1.3326	816.0	16.0	2.0454	822.0	23.5	2.9951	815.0	6.0	0.7655
1	1800	42.4	824.5	26.0	3.3438	815.0	14.0	1.7768	819.0	19.0	2.4289	827.5	29.0	3.6961	816.0	7.0	0.8931
1	3600	60.0	829.0	30.5	3.9225	819.5	18.5	2.3480	825.5	25.5	3.2598	831.5	33.0	4.2059	820.5	11.5	1.4672
1	7200	84.9	837.5	39.0	5.0157	821.5	20.5	2.6018	830.0	30.0	3.8350	837.0	38.5	4.9069	823.0	14.0	1.7861
1	10800	103.9	841.5	43.0	5.5301	830.0	29.0	3.6806	834.0	34.0	4.3464	841.5	43.0	5.4804	828.5	19.5	2.4878
1	14400	120.0	843.5	45.0	5.7873	834.0	33.0	4.1883	837.5	37.5	4.7938	845.5	47.0	5.9902	832.0	23.0	2.9343
1	18000	134.2	848.5	50.0	6.4303	837.0	36.0	4.5690	841.5	41.5	5.3051	850.0	51.5	6.5637	835.0	26.0	3.3170
1	21600	147.0	850.0	51.5	6.6232	839.0	38.0	4.8229	844.0	44.0	5.6247	852.5	54.0	6.8824	836.0	27.0	3.4446
1	92220	303.7	860.5	62.0	7.9736	853.5	52.5	6.6632	856.0	56.0	7.1587	859.0	60.5	7.7108	848.0	39.0	4.9756
2	193200	439.5	861.0	62.5	8.0379	857.0	56.0	7.1074	859.0	59.0	7.5422	862.0	63.5	8.0932	850.0	41.0	5.2307
3	268500	518.2	863.0	64.5	8.2951	859.5	58.5	7.4247	860.5	60.5	7.7340	863.5	65.0	8.2843	851.5	42.5	5.4221
5	432000	657.3	866.5	68.0	8.7453	860.0	59.0	7.4881	862.0	62.0	7.9258	867.5	69.0	8.7941	854.0	45.0	5.7410
6	527580	726.3	867.0	68.5	8.8096	861.5	60.5	7.6785	864.5	64.5	8.2453	868.0	69.5	8.8579	855.5	46.5	5.9324
7	622200	788.8	868.5	70.0	9.0025	863.5	62.5	7.9323	867.0	67.0	8.5649	868.0	69.5	8.8579	857.0	48.0	6.1238
8	691200	831.4	868.5	70.0	9.0025	864.0	63.0	7.9958	868.0	68.0	8.6928	868.5	70.0	8.9216	858.5	49.5	6.3151

Mezcla	T	T ^{0.5}	W ₀	W _t	A	m	k	ε _e	S
CN5	96100	310.0	809.0	858.5	7.84E-03	3.84E+07	2.04E-02	12.63	9.7
CR25-5	70225	265.0	801.0	864.0	7.88E-03	2.81E+07	3.02E-02	15.99	11.3
CR50-5	52900	230.0	800.0	868.0	7.82E-03	2.12E+07	3.78E-02	17.39	13.0
CR75-5	40000	200.0	798.5	868.5	7.78E-03	1.60E+07	4.50E-02	18.00	15.0
CR100-5	40000	200.0	798.5	868.5	7.85E-03	1.60E+07	4.46E-02	17.84	15.0

Notación:

T, tiempo (s)

M, masa del espécimen (g)

D, cambio de masa del espécimen, respecto de la masa inicial

I, absorción (mm)

A, área de la sección transversal (mm²)

W₀, masa inicial (g)

W_t, masa final (g)

m, resistencia a la penetración del agua (s/m²)

k, coeficiente de absorción capilar (mm/h^{0.5})

ε_e, porosidad efectiva (%)

S, sorptividad (mm/h^{0.5})

Cálculo de absorción capilar en concretos con $a/c = 0.7$

Día	S	S ^{1/2}	CR50-7			CR100-7			CR25-7			CR75-7			CN7		
			Masa	D	I	Masa	D	I	Masa	D	I	Masa	D	I	Masa	D	I
1	0	0	792.0	0	0.0000	789.5	0	0	800.0	0	0.0000	789.5	0	0	806.0	0	0
1	60	7.7	795.0	3.0	0.3858	802.0	12.5	1.6044	803.0	3.0	0.3826	797.5	8.0	1.0186	811.5	5.5	0.7145
1	300	17.3	798.5	6.5	0.8359	810.5	21.0	2.6953	807.5	7.5	0.9565	812.0	22.5	2.8648	818.0	12.0	1.5589
1	600	24.5	812.0	20.0	2.5721	815.0	25.5	3.2729	812.5	12.5	1.5941	820.0	30.5	3.8834	822.0	16.0	2.0785
1	1200	34.6	814.5	22.5	2.8937	820.0	30.5	3.9146	818.5	18.5	2.3593	824.0	34.5	4.3927	826.0	20.0	2.5982
1	1800	42.4	817.0	25.0	3.2152	823.5	34.0	4.3638	825.0	25.0	3.1882	828.0	38.5	4.9020	829.5	23.5	3.0529
1	3600	60.0	828.5	36.5	4.6942	830.0	40.5	5.1981	832.0	32.0	4.0809	832.0	42.5	5.4113	835.0	29.0	3.7674
1	7200	84.9	836.0	44.0	5.6587	837.0	47.5	6.0965	837.0	37.0	4.7185	838.0	48.5	6.1752	842.5	36.5	4.7417
1	10800	103.9	840.0	48.0	6.1732	845.0	55.5	7.1233	842.0	42.0	5.3562	847.0	57.5	7.3211	846.5	40.5	5.2613
1	14400	120.0	843.5	51.5	6.6233	850.0	60.5	7.7651	847.0	47.0	5.9938	852.0	62.5	7.9577	853.0	47.0	6.1057
1	18000	134.2	849.5	57.5	7.3949	858.0	68.5	8.7919	851.0	51.0	6.5039	859.5	70.0	8.9127	855.5	49.5	6.4305
1	21600	147.0	852.5	60.5	7.7808	865.5	76.0	9.7545	856.0	56.0	7.1416	864.0	74.5	9.4856	857.0	51.0	6.6254
1	92220	303.7	869.5	77.5	9.9671	880.0	90.5	11.6155	867.5	67.5	8.6081	879.0	89.5	11.3955	865.5	59.5	7.7296
2	193200	439.5	874.0	82.0	10.5458	881.5	92.0	11.8080	871.0	71.0	9.0545	881.5	92.0	11.7138	869.0	63.0	8.1843
3	268500	518.2	876.0	84.0	10.8030	883.0	93.5	12.0006	873.0	73.0	9.3095	883.5	94.0	11.9685	869.5	63.5	8.2492
5	432000	657.3	877.5	85.5	10.9959	884.0	94.5	12.1289	875.0	75.0	9.5646	884.0	94.5	12.0321	871.0	65.0	8.4441
6	527580	726.3	879.5	87.5	11.2532	884.5	95.0	12.1931	876.0	76.0	9.6921	885.0	95.5	12.1594	874.5	68.5	8.8988
7	622200	788.8	880.0	88.0	11.3175	884.5	95.0	12.1931	876.5	76.5	9.7559	886.5	97.0	12.3504	875.0	69.0	8.9637
8	691200	831.4	880.5	88.5	11.3818	885.0	95.5	12.2573	877.0	77.0	9.8197	887.0	97.5	12.4141	875.0	69.0	8.9637

Mezcla	T	T ^{0.5}	W ₀	W _t	A	m	k	ε _e	S
CN7	40000	200.0	806.0	875.0	7.70E-03	1.60E+07	4.48E-02	17.93	15.0
CR25-7	40000	200.0	801.0	877.0	7.88E-03	1.60E+07	4.82E-02	19.29	15.0
CR50-7	32400	180.0	800.0	880.5	7.82E-03	1.30E+07	5.72E-02	20.58	16.7
CR75-7	30625	175.0	789.5	887.0	7.78E-03	1.23E+07	7.17E-02	25.08	17.1
CR100-7	25600	160.0	789.5	885.0	7.85E-03	1.02E+07	7.61E-02	24.34	18.8

Notación:

T, tiempo (s)

M, masa del espécimen (g)

D, cambio de masa del espécimen, respecto de la masa inicial

I, absorción (mm)

A, área de la sección transversal (mm²)

W₀, masa inicial (g)

W_t, masa final (g)

m, resistencia a la penetración del agua (s/m²)

k, coeficiente de absorción capilar (mm/h^{0.5})

ε_e, porosidad efectiva (%)

S, sorptividad (mm/h^{0.5})

Apéndice 8. Frentes de carbonatación

Proceso de carbonatación natural

Día 0

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	344	3.4	4.0	3.7	37.5	0.10	0.90	0.95	3.64
CR25-5	302	4.0	4.2	4.1	37.5	0.11	0.89	0.95	4.02
CR50-5	309	4.5	4.7	4.6	37.5	0.12	0.88	0.94	4.50
CR75-5	302	5.1	5.6	5.3	37.5	0.14	0.86	0.93	5.17
CR100-5	314	6.0	5.7	5.9	37.5	0.16	0.84	0.92	5.69
CN7	338	6.0	5.6	5.8	37.5	0.15	0.85	0.92	5.64
CR25-7	288	5.8	6.5	6.2	37.5	0.16	0.84	0.92	5.97
CR50-7	302	7.5	7.0	7.3	37.5	0.19	0.81	0.90	7.00
CR75-7	295	8.2	7.7	8.0	37.5	0.21	0.79	0.89	7.65
CR100-7	308	8.5	8.1	8.3	37.5	0.22	0.78	0.89	7.97

Día 35

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	379	4.6	4.8	4.7	37.5	0.13	0.87	0.94	4.60
CR25-5	337	4.8	5.1	5.0	37.5	0.13	0.87	0.93	4.84
CR50-5	344	5.3	5.7	5.5	37.5	0.15	0.85	0.93	5.36
CR75-5	337	6.6	6.1	6.4	37.5	0.17	0.83	0.92	6.16
CR100-5	349	6.8	7.0	6.9	37.5	0.18	0.82	0.91	6.67
CN7	373	7.2	6.8	7.0	37.5	0.19	0.81	0.91	6.77
CR25-7	323	8.0	8.2	8.1	37.5	0.22	0.78	0.89	7.79
CR50-7	337	9.7	9.3	9.5	37.5	0.25	0.75	0.87	9.06
CR75-7	330	10.0	9.7	9.9	37.5	0.26	0.74	0.87	9.38
CR100-7	343	10.3	10.1	10.2	37.5	0.27	0.73	0.86	9.69

Día 56

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN7	394	7.6	8.0	7.8	37.5	0.21	0.79	0.90	7.51
CR25-7	344	9.5	9.2	9.4	37.5	0.25	0.75	0.88	8.92
CR50-7	358	10.6	11.1	10.9	37.5	0.29	0.71	0.86	10.27
CR75-7	351	11.0	10.8	10.9	37.5	0.29	0.71	0.85	10.31
CR100-7	364	11.2	11.4	11.3	37.5	0.30	0.70	0.85	10.67

Día 70

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	414	5.8	5.2	5.5	37.5	0.15	0.85	0.93	5.36
CR25-5	372	6.0	5.6	5.8	37.5	0.15	0.85	0.92	5.64
CR50-5	379	6.3	6.7	6.5	37.5	0.17	0.83	0.91	6.30
CR75-5	372	6.7	7.1	6.9	37.5	0.18	0.82	0.91	6.67
CR100-5	384	7.9	7.5	7.7	37.5	0.21	0.79	0.90	7.42

Proceso de carbonatación acelerada

Día 14

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	14	6.0	6.4	6.2	37.5	0.17	0.83	0.92	6.02
CR25-5	14	7.3	7.7	7.5	37.5	0.20	0.80	0.90	7.23
CR50-5	14	9.0	9.2	9.1	37.5	0.24	0.76	0.88	8.70
CR75-5	14	9.5	10.3	9.9	37.5	0.26	0.74	0.87	9.42
CR100-5	14	11.0	11.6	11.3	37.5	0.30	0.70	0.85	10.67
CN7	14	11.5	12.2	11.9	37.5	0.32	0.68	0.84	11.15
CR25-7	14	15.6	16.5	16.1	37.5	0.43	0.57	0.79	14.70
CR50-7	14	19.5	20.1	19.8	37.5	0.53	0.47	0.74	17.64
CR75-7	14	21.8	21.5	21.7	37.5	0.58	0.42	0.71	19.00
CR100-7	14	22.0	21.7	21.85	37.5	0.58	0.42	0.71	19.15

Día 35

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	35	12.6	12.2	12.4	37.5	0.33	0.67	0.83	11.63
CR25-5	35	14.3	13.7	14.0	37.5	0.37	0.63	0.81	13.00
CR50-5	35	16.0	16.4	16.2	37.5	0.43	0.57	0.78	14.82
CR75-5	35	16.8	16.5	16.7	37.5	0.44	0.56	0.78	15.19
CR100-5	35	20.3	20.8	20.6	37.5	0.55	0.45	0.73	18.20
CN7	35	21.5	19.8	20.7	37.5	0.55	0.45	0.72	18.28
CR25-7	35	27.5	24.0	25.8	37.5	0.69	0.31	0.66	21.77
CR50-7	35	28.2	28.4	28.3	37.5	0.75	0.25	0.62	23.28
CR75-7	35	28.4	29.2	28.8	37.5	0.77	0.23	0.62	23.55
CR100-7	35	28.6	29.9	29.3	37.5	0.78	0.22	0.61	23.79

Día 56

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN7	56	29.3	28.3	28.8	37.5	0.77	0.23	0.62	23.55
CR25-7	56	34.6	33.8	34.2	37.5	0.91	0.09	0.54	25.91
CR50-7	56	36.7	37.0	36.9	37.5	0.98	0.02	0.51	26.48
CR75-7	56	36.8	37.5	37.2	37.5	0.99	0.01	0.50	26.50
CR100-7	56	37.4	37.5	37.5	37.5	1.00	0.00	0.50	26.52

Día 70

<i>Mezcla</i>	t	x_1	x_2	p_r	re	p	1-p	1- (p/2)	p_f
CN5	70	19.3	19.9	19.6	37.5	0.52	0.48	0.74	17.49
CR25-5	70	21.8	22.5	22.2	37.5	0.59	0.41	0.70	19.36
CR50-5	70	24.4	23.8	24.1	37.5	0.64	0.36	0.68	20.70
CR75-5	70	25.2	25.5	25.4	37.5	0.68	0.32	0.66	21.52
CR100-5	70	33.6	36.7	35.2	37.5	0.94	0.06	0.53	26.17

Notación empleada

t, tiempo de exposición natural o acelerada, en días

x_1, x_2 , frente de carbonatación medido, en mm

p_r , valor promedio de x_1 y x_2

r_e , radio nominal del espécimen de prueba, en mm

p , cociente entre p_r y r_e

p_f , frente de carbonatación ajustado para una superficie plana infinita, en mm

$$p_f = r_e \sqrt{(1-p)2 \ln(1-p) + p\left(1 - \frac{p}{2}\right)}$$

Apéndice 9. Difusión de cloruros

Muestras sumergidas

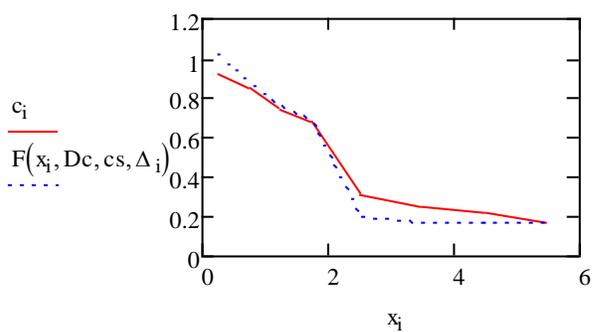
Mezcla	Muestra 1		Muestra 2		Promedio
	cm ² /mes	cm ² /s	cm ² /mes	cm ² /s	cm ² /s
CN5	0.02376077	9.167E-09	0.02701666	1.04231E-08	9.79503E-09
CR25-5	0.09043667	3.4891E-08	0.11901483	4.59162E-08	4.04035E-08
CR50-5	0.10816151	4.1729E-08	0.15884905	6.12844E-08	5.15067E-08
CR75-5	0.18900008	7.2917E-08	0.21874593	8.43927E-08	7.86547E-08
CR100-5	0.25018149	9.6521E-08	0.23092391	8.9091E-08	9.28058E-08
CN7	0.24716917	9.5358E-08	0.36421795	1.40516E-07	1.17937E-07
CR25-7	0.27978697	1.0794E-07	0.35668044	1.37608E-07	1.22775E-07
CR50-7	0.30870966	1.191E-07	0.34094608	1.31538E-07	1.25319E-07
CR75-7	0.34105703	1.3158E-07	0.31529404	1.21641E-07	1.26611E-07
CR100-7	0.36069465	1.3916E-07	0.32032298	1.23581E-07	1.31369E-07

Muestras de salpicadura (tratamiento húmedo-seco)

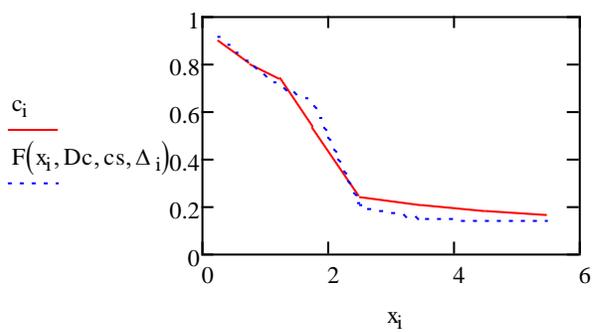
Mezcla	Muestra 1		Muestra 2		Promedio
	cm ² /mes	cm ² /s	cm ² /mes	cm ² /s	cm ² /s
CN5	0.09755093	3.7635E-08	0.01345898	5.19251E-09	2.1414E-08
CR25-5	0.26133773	1.0082E-07	0.25737012	9.9294E-08	1.00059E-07
CR50-5	0.28095856	1.0839E-07	0.29971028	1.15629E-07	1.12012E-07
CR75-5	0.34850901	1.3446E-07	0.29533653	1.13942E-07	1.24199E-07
CR100-5	0.38642219	1.4908E-07	0.30748401	1.18628E-07	1.33855E-07
CN7	0.40809249	1.5744E-07	0.47274378	1.82386E-07	1.69914E-07
CR25-7	0.58866731	2.2711E-07	0.55768093	2.15155E-07	2.21132E-07
CR50-7	0.62655378	2.4173E-07	0.61391722	2.3685E-07	2.39288E-07
CR75-7	0.67245787	2.5944E-07	0.65270042	2.51813E-07	2.55625E-07
CR100-7	0.67700726	2.6119E-07	0.65814601	2.53914E-07	2.57553E-07

Ejemplos de modelación con Mathcad®

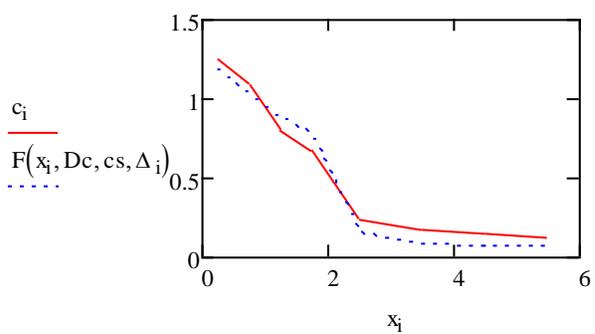
Mezcla CN7



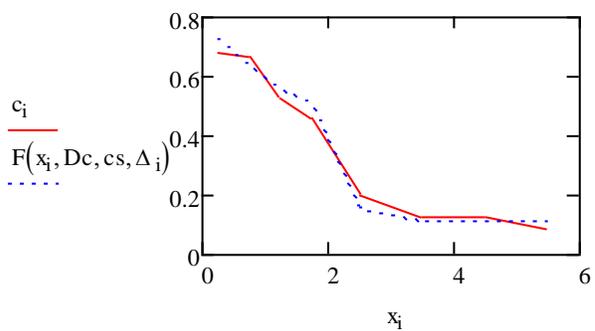
Mezcla CR25-7



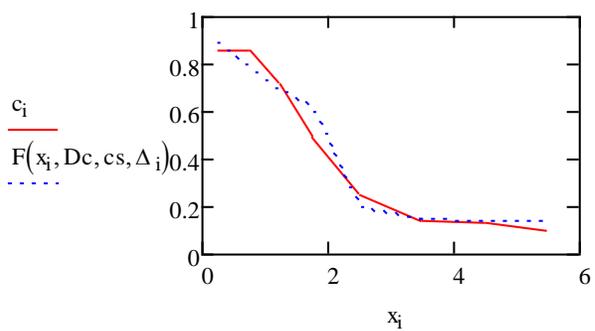
Mezcla CR100-7



Mezcla CR75-5



Mezcla CR100-5

**Nota:**

Las ordenadas corresponden a valores de concentración de cloruros y las abscisas a la profundidad alcanzada. La línea continua en rojo corresponde a los resultados reales obtenidos en laboratorio y la línea punteada en azul al modelo obtenido con Mathcad®.

Apéndice 10. Concentración de cloruros totales

Mezcla: CN5

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
	Blanco		<i>AgNO₃</i>	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	5.41	0.0093	3.005	2151	410	0.06	0.30	0.29
	2	5.33	0.0093	3.003	2151	410	0.06	0.29	
1.0	1	4.19	0.0093	2.998	2151	410	0.04	0.23	0.23
	2	4.24	0.0093	3.004	2151	410	0.04	0.23	
1.5	1	3.75	0.0093	3.005	2151	410	0.04	0.20	0.20
	2	3.78	0.0093	3.004	2151	410	0.04	0.20	
2.0	1	3.20	0.0093	3.002	2151	410	0.03	0.17	0.17
	2	3.30	0.0093	3.002	2151	410	0.03	0.17	
3.0	1	2.88	0.0093	3.002	2151	410	0.03	0.15	0.15
	2	2.94	0.0093	3.002	2151	410	0.03	0.15	
4.0	1	2.54	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.13	0.13
	2	2.40	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.12	
5.0	1	2.19	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.13	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.11	
6.0	1	2.05	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.10	0.10
	2	1.97	0.0093	3.002	2151	410	0.02	0.10	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
	Blanco		<i>AgNO₃</i>	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	4.78	0.0093	3.000	2151	410	0.05	0.26	0.27
	2	4.89	0.0093	3.000	2151	410	0.05	0.27	
1.0	1	4.75	0.0093	3.000	2151	410	0.05	0.26	0.26
	2	4.67	0.0093	3.001	2151	410	0.05	0.26	
1.5	1	4.09	0.0093	3.000	2151	410	0.04	0.22	0.23
	2	4.13	0.0093	3.000	2151	410	0.04	0.23	
2.0	1	3.61	0.0093	3.002	2151	410	0.04	0.20	0.19
	2	3.49	0.0093	3.001	2151	410	0.04	0.19	
3.0	1	2.61	0.0093	3.003	2151	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.65	0.0093	3.003	2151	410	0.03	0.14	
4.0	1	2.31	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.12	0.12
	2	2.36	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.13	
5.0	1	1.99	0.0093	3.001	2151	410	0.02	0.10	0.10
	2	1.94	0.0093	3.003	2151	410	0.02	0.10	
6.0	1	1.80	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.09	0.10
	2	1.93	0.0093	3.001	2151	410	0.02	0.10	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.26	AgNO₃	g	kg/m³	kg/m³	%	%	%
0.5	1	2.20	0.0093	3.003	2151	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.20	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.11	
1.0	1	2.20	0.0093	2.996	2151	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.19	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.11	
1.5	1	2.14	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.24	0.0093	3.001	2151	410	0.02	0.11	
2.0	1	2.17	0.0093	3.002	2151	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.11	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.11	
3.0	1	1.92	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.10	0.09
	2	1.84	0.0093	3.003	2151	410	0.02	0.09	
4.0	1	1.86	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.91	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.10	
5.0	1	1.79	0.0093	3.002	2151	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.85	0.0093	3.002	2151	410	0.02	0.09	
6.0	1	1.74	0.0093	3.000	2151	410	0.02	0.09	0.08
	2	1.71	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.08	

Mezcla: CR25-5

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.27	AgNO₃	g	kg/m³	kg/m³	%	%	%
0.5	1	5.64	0.0093	3.002	2125	410	0.06	0.31	0.31
	2	5.68	0.0093	3.002	2125	410	0.06	0.31	
1.0	1	4.83	0.0093	2.995	2125	410	0.05	0.26	0.26
	2	4.80	0.0093	3.005	2125	410	0.05	0.26	
1.5	1	4.15	0.0093	3.005	2125	410	0.04	0.22	0.22
	2	4.25	0.0093	3.003	2125	410	0.04	0.23	
2.0	1	3.64	0.0093	3.001	2125	410	0.04	0.19	0.19
	2	3.59	0.0093	3.003	2125	410	0.04	0.19	
3.0	1	3.02	0.0093	3.001	2125	410	0.03	0.16	0.16
	2	3.08	0.0093	3.002	2125	410	0.03	0.16	
4.0	1	2.55	0.0093	3.004	2125	410	0.03	0.13	0.13
	2	2.58	0.0093	3.005	2125	410	0.03	0.13	
5.0	1	2.26	0.0093	3.003	2125	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.22	0.0093	3.002	2125	410	0.02	0.11	
6.0	1	2.21	0.0093	3.000	2125	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.1	0.0093	3.007	2125	410	0.02	0.10	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso g	Concreto	Cemento	Concret o %	Cemento %	Promedio %
	Blanco		AgNO ₃		kg/m ³	kg/m ³			
0.5	1	5.96	0.0093	3.000	2125	410	0.06	0.33	0.33
	2	6.11	0.0093	3.001	2125	410	0.07	0.34	
1.0	1	5.75	0.0093	3.000	2125	410	0.06	0.32	0.32
	2	5.84	0.0093	3.003	2125	410	0.06	0.32	
1.5	1	4.72	0.0093	3.000	2125	410	0.05	0.26	0.26
	2	4.86	0.0093	3.000	2125	410	0.05	0.27	
2.0	1	3.81	0.0093	3.003	2125	410	0.04	0.21	0.21
	2	4.00	0.0093	3.003	2125	410	0.04	0.22	
3.0	1	2.75	0.0093	3.004	2125	410	0.03	0.15	0.15
	2	2.89	0.0093	3.006	2125	410	0.03	0.15	
4.0	1	2.58	0.0093	3.000	2125	410	0.03	0.14	0.13
	2	2.49	0.0093	3.000	2125	410	0.03	0.13	
5.0	1	2.11	0.0093	3.003	2125	410	0.02	0.11	0.11
	2	1.99	0.0093	3.002	2125	410	0.02	0.10	
6.0	1	1.95	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.10	0.10
	2	2.02	0.0093	3.003	2128	410	0.02	0.10	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso g	Concreto	Cemento	Concreto %	Cemento %	Promedio %
	Blanco		AgNO ₃		kg/m ³	kg/m ³			
0.5	1	2.67	0.0093	3.002	2125	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.71	0.0093	3.000	2125	410	0.03	0.14	
1.0	1	2.66	0.0093	2.997	2125	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.61	0.0093	2.998	2125	410	0.03	0.13	
1.5	1	2.56	0.0093	3.006	2125	410	0.03	0.13	0.13
	2	2.62	0.0093	3.002	2125	410	0.03	0.13	
2.0	1	2.69	0.0093	3.003	2125	410	0.03	0.14	0.13
	2	2.55	0.0093	3.003	2125	410	0.03	0.13	
3.0	1	2.30	0.0093	3.004	2125	410	0.02	0.12	0.12
	2	2.46	0.0093	3.004	2125	410	0.02	0.13	
4.0	1	1.83	0.0093	3.000	2125	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.99	0.0093	3.001	2125	410	0.02	0.10	
5.0	1	1.83	0.0093	3.003	2125	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.73	0.0093	3.002	2125	410	0.02	0.08	
6.0	1	1.23	0.0093	3.002	2125	410	0.01	0.06	0.06
	2	1.30	0.0093	3.000	2125	410	0.01	0.06	

Mezcla: CR50-5

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.27	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	6.80	0.0093	3.003	2128	410	0.07	0.37	0.37
	2	6.86	0.0093	3.000	2128	410	0.07	0.38	
1.0	1	5.00	0.0093	2.998	2128	410	0.05	0.27	0.27
	2	4.87	0.0093	3.004	2128	410	0.05	0.26	
1.5	1	4.11	0.0093	3.002	2128	410	0.04	0.22	0.23
	2	4.40	0.0093	3.002	2128	410	0.05	0.24	
2.0	1	4.10	0.0093	3.002	2128	410	0.04	0.22	0.22
	2	4.13	0.0093	3.002	2128	410	0.04	0.22	
3.0	1	3.56	0.0093	3.005	2128	410	0.04	0.19	0.18
	2	3.47	0.0093	3.003	2128	410	0.04	0.18	
4.0	1	2.64	0.0093	3.005	2128	410	0.03	0.13	0.14
	2	2.76	0.0093	3.005	2128	410	0.03	0.14	
5.0	1	2.48	0.0093	3.005	2128	410	0.02	0.13	0.12
	2	2.38	0.0093	3.003	2128	410	0.02	0.12	
6.0	1	2.22	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.23	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.11	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.19	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	6.08	0.0093	3.000	2128	410	0.06	0.34	0.34
	2	6.27	0.0093	3.000	2128	410	0.07	0.35	
1.0	1	6.02	0.0093	2.999	2128	410	0.06	0.33	0.34
	2	6.16	0.0093	3.001	2128	410	0.07	0.34	
1.5	1	4.85	0.0093	3.000	2128	410	0.05	0.27	0.27
	2	4.95	0.0093	3.003	2128	410	0.05	0.27	
2.0	1	3.74	0.0093	3.003	2128	410	0.04	0.20	0.21
	2	4.13	0.0093	3.005	2128	410	0.04	0.22	
3.0	1	2.78	0.0093	3.005	2128	410	0.03	0.15	0.15
	2	3.04	0.0093	3.004	2128	410	0.03	0.16	
4.0	1	2.73	0.0093	3.000	2128	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.40	0.0093	3.001	2128	410	0.02	0.13	
5.0	1	2.20	0.0093	3.002	2128	410	0.02	0.11	0.11
	2	2.02	0.0093	3.002	2128	410	0.02	0.10	
6.0	1	1.98	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.10	0.10
	2	1.96	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.10	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.26	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.71	0.0093	3.000	2128	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.66	0.0093	3.000	2128	410	0.03	0.14	
1.0	1	2.66	0.0093	2.999	2128	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.68	0.0093	3.001	2128	410	0.03	0.14	
1.5	1	2.61	0.0093	3.000	2128	410	0.03	0.13	0.14
	2	2.90	0.0093	3.003	2128	410	0.03	0.15	
2.0	1	2.10	0.0093	3.003	2128	410	0.02	0.10	0.11
	2	2.13	0.0093	3.005	2128	410	0.02	0.11	
3.0	1	1.65	0.0093	3.005	2128	410	0.02	0.08	0.09
	2	1.97	0.0093	3.004	2128	410	0.02	0.10	
4.0	1	1.64	0.0093	3.000	2128	410	0.02	0.08	0.08
	2	1.77	0.0093	3.001	2128	410	0.02	0.09	
5.0	1	1.48	0.0093	3.002	2128	410	0.01	0.07	0.06
	2	1.28	0.0093	3.002	2128	410	0.01	0.06	
6.0	1	1.22	0.0093	3.000	2128	410	0.01	0.05	0.06
	2	1.23	0.0093	3.000	2128	410	0.01	0.06	

Mezcla: CR75-5

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.29	0.0505	3.009	2116	410	0.13	0.68	0.68
	2	2.23	0.0505	3.012	2116	410	0.13	0.67	
1.0	1	2.10	0.0505	3.000	2116	410	0.12	0.63	0.64
	2	2.15	0.0505	3.007	2116	410	0.12	0.64	
1.5	1	1.71	0.0505	3.016	2116	410	0.10	0.51	0.52
	2	1.77	0.0505	3.011	2116	410	0.10	0.52	
2.0	1	1.41	0.0505	3.012	2116	410	0.08	0.41	0.41
	2	1.36	0.0505	3.000	2116	410	0.08	0.40	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	3.14	0.0093	3.002	2116	410	0.03	0.17	0.18
	2	3.18	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.18	
4.0	1	2.89	0.0093	3.011	2116	410	0.03	0.16	0.16
	2	2.80	0.0093	3.003	2116	410	0.03	0.16	
5.0	1	2.07	0.0093	3.004	2116	410	0.02	0.11	0.12
	2	2.12	0.0093	3.011	2116	410	0.02	0.12	
6.0	1	1.88	0.0093	3.009	2116	410	0.02	0.10	0.11
	2	1.96	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.11	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.28	0.0505	3.000	2116	410	0.13	0.68	0.70
	2	2.36	0.0505	3.000	2116	410	0.14	0.71	
1.0	1	2.25	0.0505	3.000	2116	410	0.13	0.67	0.65
	2	2.12	0.0505	3.003	2116	410	0.12	0.63	
1.5	1	1.79	0.0505	3.000	2116	410	0.10	0.53	0.51
	2	1.66	0.0505	3.003	2116	410	0.10	0.49	
2.0	1	1.57	0.0505	3.004	2116	410	0.09	0.46	0.44
	2	1.40	0.0505	3.006	2116	410	0.08	0.41	
3.0	1	0.71	0.0505	3.005	2116	410	0.04	0.20	0.22
	2	0.81	0.0505	3.002	2116	410	0.04	0.23	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
4.0	1	2.40	0.0093	3.001	2116	410	0.03	0.13	0.13
	2	2.48	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.14	
5.0	1	2.27	0.0093	3.003	2116	410	0.02	0.13	0.12
	2	2.24	0.0093	3.005	2116	410	0.02	0.12	
6.0	1	1.62	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.78	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.10	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.93	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.16	0.17
	2	3.02	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.17	
1.0	1	2.96	0.0093	3.006	2116	410	0.03	0.16	0.16
	2	2.88	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.16	
1.5	1	2.72	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.15	0.15
	2	2.80	0.0093	3.004	2116	410	0.03	0.16	
2.0	1	2.63	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.15	0.14
	2	2.60	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.14	
3.0	1	2.48	0.0093	3.004	2116	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.55	0.0093	3.006	2116	410	0.03	0.14	
4.0	1	2.50	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.40	0.0093	3.003	2116	410	0.03	0.13	
5.0	1	2.39	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.13	0.13
	2	2.46	0.0093	3.004	2116	410	0.03	0.14	
6.0	1	2.19	0.0093	3.003	2116	410	0.02	0.12	0.12
	2	2.23	0.0093	3.003	2116	410	0.02	0.12	

Mezcla: CR100-5

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.79	0.0505	3.009	2116	410	0.16	0.84	0.83
	2	2.77	0.0505	3.012	2116	410	0.16	0.83	
1.0	1	2.46	0.0505	3.000	2116	410	0.14	0.74	0.75
	2	2.51	0.0505	3.007	2116	410	0.15	0.75	
1.5	1	1.96	0.0505	3.016	2116	410	0.11	0.58	0.60
	2	2.09	0.0505	3.011	2116	410	0.12	0.62	
2.0	1	1.74	0.0505	3.012	2116	410	0.10	0.52	0.51
	2	1.73	0.0505	3.000	2116	410	0.10	0.51	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	3.04	0.0093	3.007	2116	410	0.03	0.17	0.17
	2	3.10	0.0093	3.009	2116	410	0.03	0.17	
4.0	1	1.95	0.0093	3.014	2116	410	0.02	0.11	0.11
	2	1.94	0.0093	3.008	2116	410	0.02	0.11	
5.0	1	1.70	0.0093	3.004	2116	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.71	0.0093	3.012	2116	410	0.02	0.09	
6.0	1	1.65	0.0093	3.009	2116	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.53	0.0093	3.013	2116	410	0.02	0.08	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.85	0.0505	3.000	2116	410	0.17	0.86	0.87
	2	2.92	0.0505	3.000	2116	410	0.17	0.88	
1.0	1	2.86	0.0505	2.999	2116	410	0.17	0.86	0.84
	2	2.72	0.0505	3.001	2116	410	0.16	0.82	
1.5	1	2.39	0.0505	3.000	2116	410	0.14	0.72	0.72
	2	2.42	0.0505	3.003	2116	410	0.14	0.73	
2.0	1	1.66	0.0505	3.003	2116	410	0.10	0.49	0.46
	2	1.47	0.0505	3.005	2116	410	0.08	0.43	
3.0	1	0.86	0.0505	3.005	2116	410	0.05	0.25	0.22
	2	0.71	0.0505	3.004	2116	410	0.04	0.20	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
4.0	1	2.48	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.53	0.0093	3.001	2116	410	0.03	0.14	
5.0	1	2.32	0.0093	3.002	2116	410	0.02	0.13	0.12
	2	2.08	0.0093	3.002	2116	410	0.02	0.11	
6.0	1	1.78	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.10	0.10
	2	1.80	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.10	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.87	0.0093	2.999	2116	410	0.03	0.16	0.16
	2	2.97	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.17	
1.0	1	3.03	0.0093	3.001	2116	410	0.03	0.17	0.16
	2	2.87	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.16	
1.5	1	2.95	0.0093	3.000	2116	410	0.03	0.16	0.16
	2	2.77	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.15	
2.0	1	2.59	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.64	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.15	
3.0	1	2.50	0.0093	3.005	2116	410	0.03	0.14	0.14
	2	2.58	0.0093	3.007	2116	410	0.03	0.14	
4.0	1	2.15	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.12	0.12
	2	2.21	0.0093	3.007	2116	410	0.02	0.12	
5.0	1	1.85	0.0093	3.008	2116	410	0.02	0.10	0.10
	2	1.82	0.0093	3.008	2116	410	0.02	0.10	
6.0	1	1.72	0.0093	3.000	2116	410	0.02	0.09	0.10
	2	1.79	0.0093	3.006	2116	410	0.02	0.10	

Mezcla: CN7

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.22	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.36	0.0505	3.004	2104	293	0.13	0.92	0.89
	2	2.23	0.0505	3.005	2104	293	0.12	0.86	
1.0	1	2.21	0.0505	3.002	2104	293	0.12	0.85	0.81
	2	2.03	0.0505	3.000	2104	293	0.11	0.78	
1.5	1	1.96	0.0505	3.004	2104	293	0.10	0.74	0.75
	2	1.99	0.0505	3.004	2104	293	0.11	0.76	
2.0	1	1.80	0.0505	3.005	2104	293	0.09	0.68	0.69
	2	1.88	0.0505	3.003	2104	293	0.10	0.71	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad <i>AgNO₃</i>	Peso g	Concreto kg/m ³	Cemento kg/m ³	Concreto %	Cemento %	Promedio %
	Blanco	0.75							
3.0	1	4.70	0.0093	3.006	2104	293	0.04	0.31	0.31
	2	4.61	0.0093	3.002	2104	293	0.04	0.30	
4.0	1	3.87	0.0093	3.013	2104	293	0.03	0.25	0.25
	2	3.91	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.25	
5.0	1	3.55	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.22	0.22
	2	3.44	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.21	
6.0	1	2.86	0.0093	3.000	2104	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.91	0.0093	3.000	2104	293	0.02	0.17	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad <i>AgNO₃</i>	Peso g	Concreto kg/m ³	Cemento kg/m ³	Concreto %	Cemento %	Promedio %
	Blanco	0.22							
0.5	1	2.86	0.0505	3.003	2104	293	0.13	0.90	0.88
	2	2.75	0.0505	3.000	2104	293	0.12	0.86	
1.0	1	2.68	0.0505	3.000	2104	293	0.12	0.83	0.85
	2	2.79	0.0505	3.000	2104	293	0.12	0.87	
1.5	1	2.36	0.0505	3.000	2104	293	0.10	0.69	0.72
	2	2.49	0.0505	3.001	2104	293	0.10	0.75	
2.0	1	2.24	0.0505	3.001	2104	293	0.09	0.64	0.61
	2	2.11	0.0505	3.003	2104	293	0.08	0.58	
3.0	1	1.64	0.0505	3.003	2104	293	0.05	0.38	0.37
	2	1.59	0.0505	3.005	2104	293	0.05	0.36	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad cm	Muestra	Intersección	Normalidad <i>AgNO₃</i>	Peso g	Concreto kg/m ³	Cemento kg/m ³	Concreto %	Cemento %	Promedio %
	Blanco	0.75							
4.0	1	4.24	0.0093	3.002	2104	293	0.04	0.28	0.27
	2	4.19	0.0093	3.002	2104	293	0.04	0.27	
5.0	1	3.44	0.0093	3.000	2104	293	0.03	0.21	0.21
	2	3.5	0.0093	3.002	2104	293	0.03	0.22	
6.0	1	2.92	0.0093	3.003	2104	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.84	0.0093	3.003	2104	293	0.02	0.16	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.75	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	3.21	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.16	0.0093	3.000	2104	293	0.03	0.19	
1.0	1	3.19	0.0093	3.003	2104	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.22	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.19	
1.5	1	3.16	0.0093	3.003	2104	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.20	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.19	
2.0	1	3.14	0.0093	3.005	2104	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.19	0.0093	3.004	2104	293	0.03	0.19	
3.0	1	3.07	0.0093	3.004	2104	293	0.03	0.18	0.18
	2	3.12	0.0093	3.000	2104	293	0.03	0.19	
4.0	1	3.13	0.0093	3.003	2104	293	0.03	0.19	0.18
	2	3.02	0.0093	3.000	2104	293	0.02	0.18	
5.0	1	2.68	0.0093	3.003	2104	293	0.02	0.15	0.16
	2	2.78	0.0093	3.004	2104	293	0.02	0.16	
6.0	1	2.74	0.0093	3.002	2104	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.79	0.0093	3.002	2104	293	0.02	0.16	

Mezcla: CR25-7

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.22	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.42	0.0505	3.004	2102	293	0.13	0.94	0.92
	2	2.32	0.0505	3.005	2102	293	0.13	0.90	
1.0	1	2.16	0.0505	3.002	2102	293	0.12	0.83	0.81
	2	2.08	0.0505	3.000	2102	293	0.11	0.80	
1.5	1	2.06	0.0505	3.004	2102	293	0.11	0.79	0.76
	2	1.94	0.0505	3.004	2102	293	0.10	0.74	
2.0	1	1.55	0.0505	3.005	2102	293	0.08	0.57	0.55
	2	1.46	0.0505	3.003	2102	293	0.07	0.53	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.75	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	3.72	0.0093	3.006	2102	293	0.03	0.23	0.24
	2	3.75	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.24	
4.0	1	3.39	0.0093	3.013	2102	293	0.03	0.21	0.21
	2	3.37	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.21	
5.0	1	3.04	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.18	0.18
	2	3.03	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.18	
6.0	1	2.85	0.0093	3.000	2102	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.91	0.0093	3.000	2102	293	0.02	0.17	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.22	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.86	0.0505	3.003	2102	293	0.13	0.90	0.90
	2	2.84	0.0505	3.000	2102	293	0.12	0.89	
1.0	1	2.73	0.0505	3.000	2102	293	0.12	0.85	0.86
	2	2.77	0.0505	3.000	2102	293	0.12	0.86	
1.5	1	2.51	0.0505	3.000	2102	293	0.11	0.75	0.77
	2	2.59	0.0505	3.001	2102	293	0.11	0.79	
2.0	1	2.14	0.0505	3.001	2102	293	0.08	0.59	0.56
	2	2.00	0.0505	3.003	2102	293	0.07	0.53	
3.0	1	1.41	0.0505	3.003	2102	293	0.04	0.28	0.30
	2	1.48	0.0505	3.005	2102	293	0.04	0.31	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.75	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
4.0	1	3.74	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.24	0.23
	2	3.69	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.23	
5.0	1	3.44	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.21	0.21
	2	3.51	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.22	
6.0	1	2.96	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.85	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.17	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.75	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	3.21	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.16	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.19	
1.0	1	3.19	0.0093	3.003	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.22	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.19	
1.5	1	3.16	0.0093	3.003	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.20	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.19	
2.0	1	3.14	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	3.19	0.0093	3.004	2102	293	0.03	0.19	
3.0	1	3.07	0.0093	3.004	2102	293	0.03	0.18	0.18
	2	3.12	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.19	
4.0	1	3.13	0.0093	3.003	2102	293	0.03	0.19	0.18
	2	3.02	0.0093	3.000	2102	293	0.02	0.18	
5.0	1	2.68	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.15	0.16
	2	2.78	0.0093	3.004	2102	293	0.02	0.16	
6.0	1	2.74	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.79	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.16	

Mezcla: CR50-7

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.83	0.0505	3.005	2102	293	0.17	1.18	1.17
	2	2.76	0.0505	3.009	2102	293	0.16	1.15	
1.0	1	2.14	0.0505	3.000	2102	293	0.12	0.89	0.90
	2	2.19	0.0505	3.001	2102	293	0.13	0.91	
1.5	1	1.68	0.0505	3.013	2102	293	0.10	0.69	0.70
	2	1.73	0.0505	3.005	2102	293	0.10	0.71	
2.0	1	1.44	0.0505	3.006	2102	293	0.08	0.59	0.57
	2	1.36	0.0505	3.004	2102	293	0.08	0.56	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	3.72	0.0093	3.002	2102	293	0.04	0.29	0.29
	2	3.75	0.0093	3.005	2102	293	0.04	0.29	
4.0	1	2.89	0.0093	3.011	2102	293	0.03	0.22	0.22
	2	2.80	0.0093	3.003	2102	293	0.03	0.22	
5.0	1	2.07	0.0093	3.004	2102	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.12	0.0093	3.011	2102	293	0.02	0.16	
6.0	1	1.88	0.0093	3.009	2102	293	0.02	0.14	0.15
	2	1.96	0.0093	3.000	2102	293	0.02	0.15	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.75	0.0505	3.006	2102	293	0.16	1.15	1.17
	2	2.83	0.0505	3.000	2102	293	0.17	1.19	
1.0	1	2.62	0.0505	3.000	2102	293	0.15	1.10	1.07
	2	2.51	0.0505	3.000	2102	293	0.15	1.05	
1.5	1	2.19	0.0505	3.000	2102	293	0.13	0.91	0.91
	2	2.21	0.0505	3.011	2102	293	0.13	0.92	
2.0	1	1.81	0.0505	3.007	2102	293	0.10	0.75	0.73
	2	1.71	0.0505	3.007	2102	293	0.10	0.70	
3.0	1	1.03	0.0505	3.003	2102	293	0.06	0.41	0.44
	2	1.14	0.0505	3.012	2102	293	0.06	0.46	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
4.0	1	2.95	0.0093	3.005	2102	293	0.03	0.23	0.23
	2	2.89	0.0093	3.003	2102	293	0.03	0.22	
5.0	1	2.79	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.22	0.22
	2	2.83	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.22	
6.0	1	2.00	0.0093	3.005	2102	293	0.02	0.15	0.16
	2	2.08	0.0093	3.015	2102	293	0.02	0.16	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de Cl^-		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.06	$AgNO_3$	g	kg/m^3	kg/m^3	%	%	%
0.5	1	2.50	0.0093	3.002	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	2.52	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.19	
1.0	1	2.48	0.0093	3.000	2102	293	0.03	0.19	0.19
	2	2.40	0.0093	3.013	2102	293	0.03	0.18	
1.5	1	2.24	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.32	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.18	
2.0	1	2.15	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.09	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.16	
3.0	1	1.92	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.15	0.15
	2	2.00	0.0093	3.005	2102	293	0.02	0.15	
4.0	1	2.00	0.0093	3.000	2102	293	0.02	0.15	0.15
	2	1.91	0.0093	3.005	2102	293	0.02	0.15	
5.0	1	1.90	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.14	0.15
	2	1.97	0.0093	3.002	2102	293	0.02	0.15	
6.0	1	2.01	0.0093	3.001	2102	293	0.02	0.15	0.15
	2	1.94	0.0093	3.001	2102	293	0.02	0.15	

Mezcla: CR75-7

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de Cl^-		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.22	$AgNO_3$	g	kg/m^3	kg/m^3	%	%	%
0.5	1	2.94	0.0505	2.995	2096	293	0.16	1.16	1.13
	2	2.78	0.0505	3.000	2096	293	0.15	1.09	
1.0	1	2.49	0.0505	3.000	2096	293	0.14	0.97	0.97
	2	2.50	0.0505	3.008	2096	293	0.14	0.97	
1.5	1	2.09	0.0505	3.000	2096	293	0.12	0.85	0.83
	2	2.02	0.0505	3.001	2096	293	0.11	0.82	
2.0	1	1.53	0.0505	3.005	2096	293	0.08	0.61	0.63
	2	1.64	0.0505	3.001	2096	293	0.09	0.65	
3.0	1	0.89	0.0505	3.000	2096	293	0.05	0.33	0.32
	2	0.81	0.0505	3.002	2096	293	0.04	0.30	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.11	AgNO₃	g	kg/m³	kg/m³	%	%	%
4.0	1	3.13	0.0093	3.001	2096	293	0.03	0.24	0.23
	2	3.04	0.0093	3.000	2096	293	0.03	0.23	
5.0	1	2.42	0.0093	3.000	2096	293	0.03	0.18	0.19
	2	2.52	0.0093	3.007	2096	293	0.03	0.19	
6.0	1	2.42	0.0093	3.003	2096	293	0.03	0.18	0.19
	2	2.53	0.0093	3.003	2096	293	0.03	0.19	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.01	AgNO₃	g	kg/m³	kg/m³	%	%	%
0.5	1	3.04	0.0505	3.000	2096	293	0.18	1.29	1.32
	2	3.15	0.0505	3.000	2096	293	0.19	1.34	
1.0	1	2.95	0.0505	3.000	2096	293	0.18	1.26	1.27
	2	3.02	0.0505	3.002	2096	293	0.18	1.28	
1.5	1	1.86	0.0505	3.000	2096	293	0.11	0.79	0.82
	2	1.99	0.0505	3.005	2096	293	0.12	0.84	
2.0	1	1.38	0.0505	3.005	2096	293	0.08	0.58	0.60
	2	1.44	0.0505	3.015	2096	293	0.08	0.61	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de cl⁻		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.11	AgNO₃	g	kg/m³	kg/m³	%	%	%
3.0	1	3.60	0.0093	3.003	2096	293	0.04	0.27	0.27
	2	3.46	0.0093	3.001	2096	293	0.04	0.26	
4.0	1	2.54	0.0093	3.000	2096	293	0.03	0.19	0.19
	2	2.57	0.0093	3.001	2096	293	0.03	0.19	
5.0	1	2.49	0.0093	3.002	2096	293	0.03	0.19	0.18
	2	2.33	0.0093	3.003	2096	293	0.02	0.17	
6.0	1	2.06	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.15	0.15
	2	2.10	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.16	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.05	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.29	0.0093	3.001	2096	293	0.02	0.18	0.17
	2	2.26	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.17	
1.0	1	2.23	0.0093	3.001	2096	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.29	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.18	
1.5	1	2.22	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.19	0.0093	3.001	2096	293	0.02	0.17	
2.0	1	2.12	0.0093	3.001	2096	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.05	0.0093	3.003	2096	293	0.02	0.16	
3.0	1	1.96	0.0093	3.006	2096	293	0.02	0.15	0.14
	2	1.74	0.0093	3.006	2096	293	0.02	0.13	
4.0	1	1.88	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.14	0.14
	2	1.90	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.15	
5.0	1	1.79	0.0093	3.002	2096	293	0.02	0.14	0.14
	2	1.77	0.0093	3.002	2096	293	0.02	0.14	
6.0	1	1.48	0.0093	3.000	2096	293	0.02	0.11	0.12
	2	1.62	0.0093	3.001	2096	293	0.02	0.12	

Mezcla: CR100-7

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de cl		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.01	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.97	0.0505	3.000	2081	293	0.18	1.25	1.27
	2	3.05	0.0505	3.008	2081	293	0.18	1.29	
1.0	1	2.58	0.0505	3.000	2081	293	0.15	1.09	1.08
	2	2.52	0.0505	3.002	2081	293	0.15	1.06	
1.5	1	1.91	0.0505	3.011	2081	293	0.11	0.80	0.80
	2	1.89	0.0505	3.012	2081	293	0.11	0.79	
2.0	1	1.63	0.0505	3.009	2081	293	0.10	0.68	0.67
	2	1.55	0.0505	3.001	2081	293	0.09	0.65	

Zona sumergida					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.53	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	3.58	0.0093	3.005	2081	293	0.03	0.24	0.24
	2	3.63	0.0093	3.003	2081	293	0.03	0.24	
4.0	1	2.68	0.0093	3.004	2081	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.72	0.0093	3.002	2081	293	0.02	0.17	
5.0	1	2.49	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.15	0.15
	2	2.53	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.16	
6.0	1	2.21	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.13	0.13
	2	2.27	0.0093	3.001	2081	293	0.02	0.14	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.01	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	3.16	0.0505	2.999	2081	293	0.19	1.34	1.34
	2	3.18	0.0505	3.000	2081	293	0.19	1.34	
1.0	1	3.07	0.0505	2.999	2081	293	0.18	1.30	1.29
	2	3.04	0.0505	3.002	2081	293	0.18	1.28	
1.5	1	2.39	0.0505	3.000	2081	293	0.14	1.01	1.00
	2	2.35	0.0505	3.005	2081	293	0.14	0.99	
2.0	1	1.92	0.0505	3.005	2081	293	0.11	0.81	0.82
	2	1.96	0.0505	3.005	2081	293	0.12	0.83	

Zona de salpicadura					Peso unitario		Concentración de <i>cl</i>		
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	Promedio
cm	Blanco	0.53	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
3.0	1	4.55	0.0093	3.002	2081	293	0.04	0.31	0.31
	2	4.42	0.0093	3.002	2081	293	0.04	0.30	
4.0	1	3.15	0.0093	3.001	2081	293	0.03	0.20	0.22
	2	3.50	0.0093	3.001	2081	293	0.03	0.23	
5.0	1	2.80	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.18	0.17
	2	2.68	0.0093	3.008	2081	293	0.02	0.17	
6.0	1	2.13	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.12	0.13
	2	2.18	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.13	

Zona seca					Peso unitario		Concentración de cl'		Promedio
Profundidad	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	
cm	Blanco	0.22	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
0.5	1	2.70	0.0093	2.998	2081	293	0.03	0.19	0.19
	2	2.64	0.0093	3.000	2081	293	0.03	0.19	
1.0	1	2.59	0.0093	3.007	2081	293	0.03	0.18	0.18
	2	2.43	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.17	
1.5	1	2.31	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.16	0.17
	2	2.39	0.0093	3.006	2081	293	0.02	0.17	
2.0	1	2.37	0.0093	3.004	2081	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.49	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.18	
3.0	1	2.41	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.17	0.17
	2	2.32	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.16	
4.0	1	2.33	0.0093	3.000	2081	293	0.02	0.16	0.17
	2	2.46	0.0093	3.005	2081	293	0.02	0.17	
5.0	1	2.23	0.0093	3.008	2081	293	0.02	0.16	0.16
	2	2.27	0.0093	3.008	2081	293	0.02	0.16	
6.0	1	1.82	0.0093	3.001	2081	293	0.02	0.12	0.13
	2	1.86	0.0093	3.011	2081	293	0.02	0.13	

Concentraciones iniciales

14/10/2013					Peso unitario		Concentración de cl'		Promedio
Mezcla	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	
	Blanco	0.4	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	
CR25-5	1	1.8	0.0093	3.001	2122	410	0.02	0.08	0.09
	2	2.1	0.0093	3.006	2122	410	0.02	0.10	
CR25-7	1	2.4	0.0093	3.005	2102	293	0.02	0.16	0.14
	2	2	0.0093	3.003	2102	293	0.02	0.13	
CR75-7	1	2	0.0093	3.002	2096	293	0.02	0.13	0.11
	2	1.7	0.0093	3.002	2096	293	0.01	0.10	
CR75-5	1	2.1	0.0093	3.004	2116	410	0.02	0.10	0.11
	2	2.7	0.0093	3.007	2116	410	0.03	0.13	

16/10/2013					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		Promedio
Mezcla	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	
	Blanco	0.1	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	
CR50-5	1	1.7	0.0093	3.006	2128	410	0.02	0.09	0.09
	2	1.6	0.0093	3.004	2128	410	0.02	0.09	
CN7	1	2.1	0.0093	3.003	2104	293	0.02	0.16	0.17
	2	2.4	0.0093	3.003	2104	293	0.03	0.18	
CR100-5	1	2.4	0.0093	3.001	2116	410	0.03	0.13	0.14
	2	2.6	0.0093	3.001	2116	410	0.03	0.14	

18/10/2013					Peso unitario		Concentración de cl ⁻		Promedio
Mezcla	Muestra	Intersección	Normalidad	Peso	Concreto	Cemento	Concreto	Cemento	
	Blanco	0.2	AgNO ₃	g	kg/m ³	kg/m ³	%	%	
CR50-7	1	1.5	0.0093	3.002	2102	293	0.01	0.10	0.10
	2	1.4	0.0093	3.002	2102	293	0.01	0.09	
CN5	1	1.7	0.0093	3.004	2151	410	0.02	0.09	0.10
	2	2.2	0.0093	3.005	2151	410	0.02	0.12	
CR100-7	1	1.2	0.0093	3.007	2081	293	0.01	0.08	0.08
	2	1.3	0.0093	3.005	2081	293	0.01	0.09	