

*A mi hijita, Rocio,
a mi esposo, Ignacio;
a mi papá y a mi mamá, Augusto y Stella,
a mi abuela Gorda y a mis abuelos, Roque y Choli.*

Mecanismo de rotura en tracción de hormigones con agregados reciclados

MARCIA LAURA CASUCCIO

Director: Raúl Luis Zerbino

Tesis presentada para el grado de MAGÍSTER

**Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
UNCPBA**

Abril de 2009

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer especialmente a mi familia, por estar siempre conmigo, alentándome.

También quiero dar las gracias a mi Director de Tesis, Dr. Raúl Zerbino, y a la Ing. Graciela Giaccio, por su asesoramiento, apoyo y asistencia durante el transcurso de este proyecto.

Por último quiero agradecer a mis compañeros, por las horas de trabajo compartidas, al Director y al subdirector del LEMIT, Ing. Luis Traversa e Ing. Ángel Di Maio, por abrirme las puertas del laboratorio, y a todo el personal por su colaboración en las tareas desarrolladas.

Resumen

El uso de hormigón reciclado aparece como uno de los temas de interés en el campo de la tecnología del hormigón considerando la necesidad de incorporar criterios de desarrollo sustentable en ámbito de la construcción civil.

Los agregados reciclados poseen características particulares con respecto a los agregados naturales; en general se destacan su mayor porosidad y absorción, como también su menor densidad y resistencia. Existen antecedentes que indican que las características de las interfaces matriz-agregado reciclado favorecen la adherencia. Al mismo tiempo se ha demostrado que los cambios en la rigidez del hormigón con agregados reciclados son más importantes que los registrados en la resistencia a compresión. Estos hechos permiten presuponer que pueden existir cambios en el mecanismo de falla del hormigón con agregados reciclados, particularmente a medida que se elevan los niveles de resistencia.

Esta tesis tiene como objetivo analizar el mecanismo de rotura bajo cargas de tracción en hormigón con agregados reciclados. En primer lugar se presenta la caracterización de los agregados gruesos naturales y reciclados a través de las medidas de densidad, absorción, desgaste y estimación de su resistencia a través de ensayos de carga puntual, y se analiza la adherencia de morteros con diferentes relaciones agua/cemento con agregados naturales (piedra partida granítica) y dos tipos de agregado reciclado obtenidos a partir de la trituración de un hormigón de resistencia normal y un hormigón de alta resistencia. Seguidamente se analizan tres series de hormigones con diferentes niveles de resistencia las cuales incluyen un hormigón de referencia elaborado con agregado natural y dos hormigones reciclados elaborados con los mismos agregados reciclados. Se evaluaron la respuesta en flexión de vigas entalladas, la resistencia a tracción por compresión diametral y el comportamiento bajo compresión uniaxial sobre cilindros normalizados. Con el fin de considerar el efecto de los agregados naturales y reciclados y de los distintos niveles de resistencia de la matriz se analizaron las superficies de fractura observando la distribución y estado de los agregados e interfaces.

Los resultados permiten discutir la incidencia que poseen la adherencia de interfaces y la resistencia relativa de las fases componentes del hormigón sobre el mecanismo de rotura del compuesto.

Abstract

The use of recycled aggregate concrete (RAC) acquires particular interest in civil construction regarding sustainable development.

Recycled aggregates usually present greater porosity and absorption, and also lower density and strength than natural aggregates. In addition the characteristics of the interfacial transition zones between the cement paste and the aggregates improve bond strength. Many experiences showed that reduction in concrete stiffness is higher than in concrete strength when prepared with recycled aggregates. As a consequence the failure mechanisms in RAC could be affected by the above stated factors, especially if concrete strength levels increase.

The aim of this thesis is to analyze the fracture mechanism under tensile loads on RAC. Firstly the natural and recycled coarse aggregates are characterized. The results of density, water absorption, abrasion, and the estimate strength through punctual point tests are presented. The bond strength of mortars of different water/cement ratios, natural aggregates (granite stone) and two types of recycled aggregates obtained by crushing a normal strength concrete and a high strength concrete was also analyzed. Next, three Series of concretes of different compressive strength levels are studied. Each Series includes a reference concrete prepared with natural crushed stone and two RAC prepared with both coarse aggregates. Flexural tests on notched beams, splitting test and uniaxial compression tests on standard cylinders were performed. In addition, the characteristics of the fracture surfaces were analyzed in order to determine the amount, distribution and state of broken aggregates and interfaces.

The effect of the interface bond and the strength of the concrete component phases on the fracture mechanism of concrete are discussed.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Índice de anexos	viii
Nomenclatura	ix
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Alcance del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Hipótesis de trabajo	2
1.4. Estructura de la Tesis	3
Capítulo 2: Antecedentes y normativas	5
2.1. Antecedentes e importancia del tema	5
2.1.1: Propiedades de los agregados reciclados	6
2.1.2: Propiedades del hormigón reciclado	14
2.1.2.1: Estado fresco	14
2.1.2.2: Estado endurecido	17
2.1.2.2.1: Propiedades físicas	18
2.1.2.2.2: Propiedades mecánicas	20
2.1.3: Conclusiones	27
2.2. Estudio de Normas y Reglamentos	28
2.2.1. Normas y/o reglamentos seleccionados	29
2.2.2. Requerimientos para los agregados reciclados	30
2.2.3. Requerimientos para los hormigones reciclados	35
2.2.4. Conclusiones	41
Capítulo 3: Programa experimental y metodología de ensayo	44
3.1. Programa experimental	44
3.2. Metodología de ensayo	46
3.2.1. Caracterización de los agregados	46
3.2.2. Estudios sobre hormigón	49

Capítulo 4: Caracterización de agregados	54
4.1. Granulometría	54
4.2. Absorción y densidad	56
4.3. Índice de lajosis y elongación	56
4.4. Resistencia de los agregados	57
4.5. Conclusiones	58
Capítulo 5: Evaluación de la adherencia matriz-agregado	60
5.1. Materiales y mezclas	60
5.3. Programa de ensayos	63
5.4. Resultados y análisis	64
5.5. Conclusiones	65
Capítulo 6: Mecanismo de rotura en tracción	67
6.1. Materiales y mezclas	67
6.2. Detalles experimentales	70
6.3. Resultados y discusión	70
6.4. Conclusiones	79
Capítulo 7: Consideraciones Finales	80
7.1. Conclusiones	80
7.2. Estudios futuros	82
Capítulo 8: Bibliografía	84

Índice de figuras

Figura 3.1. Forma y tamaño de las puntas utilizadas en el ensayo de carga puntual	47
Figura 3.2. Características de las muestras utilizadas en el ensayo de carga puntual	48
Figura 3.3. Ensayo de adherencia matriz-agregado	49
Figura 3.4. Ensayo de compresión	50
Figura 3.5. Ensayo de flexión	51
Figura 3.6. Ensayo de tracción indirecta según norma IRAM 1658	52
Figura 3.7. Ensayo de tracción indirecta realizado	52
Figura 4.1. Curvas granulométricas de los agregados gruesos	55
Figura 5.1. Curvas granulométricas de las arenas	63
Figura 6.1. Curvas granulométricas de los agregados gruesos naturales y reciclados	68
Figura 6.2. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad	72
Figura 6.3a. Variación de la resistencia a tracción con la resistencia a compresión	73
Figura 6.3b. Resistencia a tracción: flexión vs compresión diametral	73
Figura 6.4. Curvas carga-flecha y carga-apertura de fisuras	75
Figura 6.5. Variación de la energía de fractura con la resistencia a compresión	76
Figura 6.6. Variación de la longitud característica con la resistencia a compresión	77
Figura 6.7. Serie 2: Superficies de fractura de los hormigones	78

Índice de tablas

Tabla 2.1. Requerimientos de los agregados reciclados según Código Alemán	31
Tabla 2.2. Requerimientos de los agregados reciclados según Recomendación RILEM	32
Tabla 2.3. Requisitos de los agregados reciclados según Recomendación Española	33
Tabla 2.4. Aplicación y restricciones de los hormigones reciclados según Código Alemán	36
Tabla 2.5. Máxima cantidad de agregado reciclado a utilizar según Código Alemán	36
Tabla 2.6. Restricción al empleo de hormigones según Recomendación RILEM	38
Tabla 2.7. Criterios de durabilidad de los hormigones reciclados según Recomendación RILEM	39
Tabla 2.8. Coeficientes de corrección para estimar las propiedades de los hormigones según RILEM	41
Tabla 4.1. Granulometría de los agregados gruesos	55
Tabla 4.2. Absorción y Densidad de los agregados gruesos	56
Tabla 4.3. Índice de lajosidad y elongación de los agregados	57
Tabla 4.4. Índice de carga puntual y resistencia estimada de los agregados	58
Tabla 5.1. Características de los agregados	61
Tabla 5.2. Morteros elaborados	62
Tabla 5.3. Granulometría de las arenas	62
Tabla 5.4. Programa de ensayos	64
Tabla 5.5. Resultados de los ensayos de adherencia matriz-agregado	65
Tabla 6.1. Propiedades de los agregados gruesos	68
Tabla 6.2. Hormigones elaborados	69
Tabla 6.3. Resultados de los ensayos. Propiedades físicas	71
Tabla 6.4. Resultados de los ensayos. Comportamiento mecánico	71
Tabla 6.5. Relaciones entre propiedades	74
Tabla 6.6. Valores relativos al hormigón G	74
Tabla 6.7. Relevamiento de las superficies de rotura en tracción	78

Índice de anexos

Anexo 1: Ensayo de Carga Puntual. Resistencia	89
Anexo 2-A: Módulo de rotura del agregado	95
Anexo 2-B: Módulo de rotura de la matriz	102
Anexo 2-C: Módulo de rotura de la interfaz	106
Anexo 3: Curvas carga-flecha y carga-CMOD	121

Nomenclatura

A:	Sección de rotura de los agregados (ensayo de carga puntual)
A:	Hormigón elaborado con 100 % de agregado reciclado <i>Ra</i>
AA:	Arena argentina
Abs.:	Absorción de agua a 24 horas
ACI:	American Concrete Institute
a/c:	Relación agua/cemento
A_{lig} :	Área de ligadura de la viga antes del ensayo
AN:	Agregado natural
AO:	Arena oriental
A_0 :	Superficies arenadas
AR:	Agregado reciclado
ASTM:	American Society for Testing and Materials
<i>b</i> :	Ancho de la viga
B:	Hormigón elaborado con 100 % de agregado reciclado <i>Rb</i>
BS:	British Standards
C:	Superficies cortadas
CEN:	European Committee for Standardization
CIRSOC:	Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para Obras Civiles
CMOD:	Apertura de fisura
COV:	Coeficiente de variación
<i>D</i> :	Ancho de los agregados en la sección de rotura (ensayo de carga puntual)
<i>De</i> :	Diámetro equivalente de los agregados en la sección de rotura (ensayo de carga puntual)
DIN:	Deutsche Industrie Norm
Ds:	Densidad seca
Dsss:	Densidad saturada y superficie seca
<i>E</i> :	Módulo de elasticidad estático del hormigón
EHE:	Instrucción Española de Hormigón Estructural
EN:	European Standards
ENV:	Eurocódigos Estructurales
F:	Superficies fracturadas
<i>F</i> :	Factor de corrección del índice de carga puntual <i>Is</i>
f_{cd} :	Resistencia a tracción por compresión diametral del hormigón

f'_c :	Resistencia a compresión del hormigón
f'_{cM} :	Resistencia a compresión del mortero
$F_{máx}$:	Carga máxima de rotura de la viga
f_{net} :	Resistencia a tracción del hormigón
f_i :	Resistencia a tracción del hormigón para el cálculo de la longitud característica
g :	Piedra partida granítica
G :	Hormigón elaborado con una combinación de piedra partida granítica g
G_F :	Energía de fractura del hormigón
g 6-12:	Piedra partida granítica fracción 6-12 mm
g 6-20:	Piedra partida granítica fracción 6-20 mm
g 10-30:	Piedra partida granítica fracción 10-30 mm
h :	Altura neta de la viga
I_s :	Índice de carga puntual de los agregados
$I_s(50)$:	Índice de carga puntual estándar de los agregados
iE :	Índice de elongación de los agregados
iL :	Índice de lajosidad de los agregados
IMR:	Módulo de rotura de la interfaz
IMR/MMR:	Adherencia relativa de la interfaz
IRAM:	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
ISO:	International Organization for Standardization
l :	Luz de ensayo de la viga
l_{ch} :	Longitud característica de la viga
LEMIT-CIC:	Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica-Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires
LVDT:	Transformador diferencial variable lineal
Ma :	Mortero reciclado relación agua/cemento 0.30
Mb :	Mortero reciclado relación agua/cemento 0.50
M_1 :	Mortero relación agua/cemento 0.50
M_{2-1} :	Mortero relación agua/cemento 0.35
M_{2-2} :	Mortero relación agua/cemento 0.30
m_g :	Contribución del peso de la viga
MMR:	Módulo de rotura del mortero
q :	Piedra partida cuarcítica
q 6-20:	Piedra partida cuarcítica fracción 6-20 mm

q_u :	Resistencia a compresión de los agregados estimada mediante el índice de carga puntual estándar $I_s(50)$
P :	Carga de rotura de los agregados (ensayo de carga puntual)
prEN:	Drafts European Standards
prENV:	Proyectos de Eurocódigos Estructurales
PUV:	Peso de la unidad de volumen
R_a :	Agregado reciclado obtenido de la trituración de hormigón de relación agua/cemento 0.30
R_b :	Agregado reciclado obtenido de la trituración de hormigón de relación agua/cemento 0.50
R_d :	Agregado reciclado obtenido de la trituración de hormigón de calidad desconocida
RILEM:	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
R_v :	Agregado reciclado obtenido de la trituración de losas de hormigón levantadas de una obra vial
SS:	Swedish Standard
UNE:	Normas españolas
UNE-EN:	Versión oficial en Español de las Normas Europeas EN
Vol.:	Volumen
W :	Altura de los agregados en la sección de rotura (ensayo de carga puntual)
W_0 :	Trabajo de fractura igual al área bajo la curva carga-flecha
δ_0 :	Desplazamiento final de la viga
μ :	Relación de Poisson del hormigón
80-20:	Combinación 80 % arena oriental y 20 % arena argentina
60-40:	Combinación 60 % arena oriental y 40 % arena argentina

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ALCANCE DEL PROBLEMA

El empleo de hormigón elaborado con agregados reciclados obtenidos a partir de la demolición de estructuras de hormigón surge de la necesidad de incorporar criterios de desarrollo sustentable en el ámbito de la construcción civil. Esta búsqueda de nuevas aplicaciones se debe principalmente a las necesidades crecientes de materia prima y a la importancia de minimizar el consumo de los recursos naturales.

El reciclado presenta no sólo ventajas medioambientales, al preservar los recursos naturales y disminuir las cantidades que se depositan, sino también beneficios económicos al disminuir los costos de obtención y transporte del agregado. Por lo tanto, la utilización de residuos de la construcción para la elaboración de hormigón conforma una de las principales alternativas de aplicación, dado que se transforma en un caso óptimo (tanto económico como ambiental) al ser introducido dentro del mismo insumo del que proviene.

La importancia e interés en el tema se refleja en muchos países donde ya se realizan estudios e investigaciones sobre el reciclado de residuos de la construcción para el uso como agregados gruesos en la elaboración de hormigones, existiendo actualmente reglamentaciones que establecen la utilización de dicho material como reemplazo total o parcial del agregado natural. En nuestro país, en cambio, no se da la misma situación ya que se carece de algún tipo de normativa o recomendación para el empleo de materiales reciclados provenientes de desechos de construcción. Sin embargo la necesidad de disposición de residuos en zonas altamente urbanizadas demuestra la importancia del tema.

Aunque varios trabajos han demostrado la posibilidad del empleo de hormigón reciclado como agregado para la elaboración de nuevos hormigones, con frecuencia

se utilizaron en casos donde se requerían hormigones de baja calidad. El mayor conocimiento de sus propiedades propiciará un uso más generalizado dando lugar a hormigones con niveles de resistencia y durabilidad similares a los exigidos para los hormigones con agregados naturales.

Los agregados reciclados poseen características particulares con respecto a los agregados naturales de uso frecuente. Entre ellas aparecen una mayor porosidad y absorción, menor densidad y resistencia. Al mismo tiempo existen antecedentes que muestran que la adherencia en las interfaces matriz-agregado reciclado resulta mayor o al menos igual que la desarrollada con agregados naturales. Estos hechos permiten presuponer que pueden existir cambios en las propiedades del hormigón con agregados reciclados, particularmente en el mecanismo de rotura debido a la mejor adherencia de interfaces y la menor resistencia relativa del agregado reciclado.

Por tal motivo se estudió la estructura a nivel material y las propiedades de los hormigones con agregado reciclado, incluyendo las características de la fase agregado y su influencia sobre las propiedades del hormigón, principalmente en estado endurecido.

1.2. OBJETIVOS

El plan de tesis, el cual se enmarcó dentro de una línea de investigación que se desarrolla en el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica LEMIT-CIC (“Disposición de residuos en materiales con cemento Pórtland”), tiene como objetivo general favorecer el empleo de desechos de la construcción y demolición en la elaboración de nuevos hormigones, con vistas a la preservación de recursos naturales no renovables y cuidado del medio ambiente.

Asimismo se planteó como objetivo específico comprender el mecanismo de funcionamiento y fractura en hormigón con agregados reciclados en orden a lograr criterios para la dosificación y el diseño del material.

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Los antecedentes muestran que desde el punto de vista mecánico el uso de agregados reciclados puede requerir incrementos en el contenido de agua del hormigón, pero si sólo se emplea la fracción gruesa del agregado las diferencias son

mínimas. Los cambios en la demanda de agua pueden compensarse presaturando los agregados (Hansen and Narud, 1983, Rasheeduzzafar y Khan, 1984, Sri Ravindrarajah and Tam, 1985, Sri Ravindrarajah et al, 1987, Vázquez y Barra, 2002). Asimismo la mayor capacidad de absorción de los agregados, que implicaría una mayor demanda de agua si estos no se utilizan saturados, puede ser compensada utilizando aditivos reductores de agua.

Las propiedades del hormigón estarán afectadas por las características de los agregados reciclados, en especial cuando se emplean altos porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado. Asimismo dicha influencia del agregado grueso, al igual que para los agregados naturales, aumenta a medida que aumenta el nivel de resistencia del hormigón (Hansen and Narud, 1983, Rasheeduzzafar and Khan, 1984, Sri Ravindrarajah and Tam, 1985).

Numerosas referencias dan cuenta del rol de las interfaces en el mecanismo de fractura del hormigón y cómo inciden la resistencia relativa de las fases componentes (mortero y agregados) así como la presencia de defectos en las zonas de transición (Zerbino, 1998 a y b, Giaccio and Zerbino, 1998, Giaccio et al, 1992, Giaccio et al, 1993). La mejor adherencia de interfaces y la menor resistencia relativa del agregado reciclado pueden incidir sobre el mecanismo de rotura.

Los efectos más importantes del uso de hormigón triturado como agregado reciclado se relacionarán con la deformabilidad del hormigón y con cambios en el mecanismo de fractura. Surge entonces que el uso de agregados reciclados produce cambios en el mecanismo de rotura del hormigón debido principalmente a una mayor adherencia en las zonas de transición, hecho que se hace más evidente para hormigones de elevada resistencia.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el presente Capítulo se expusieron, como punto de partida, el alcance, los objetivos propuestos, tanto generales como específicos, y las hipótesis de trabajo. Posteriormente se presenta la estructura de la tesis.

En el Capítulo 2 se desarrolla un estado del arte sobre las propiedades de los hormigones elaborados con agregados reciclados, en particular sobre la adherencia matriz-agregado y la influencia de ésta sobre el mecanismo de rotura del hormigón. En

una segunda parte se realiza una comparación entre algunas de las recomendaciones existentes en el ámbito internacional, las cuales establecen los porcentajes máximos en que dichos agregados reciclados pueden emplearse para la elaboración de nuevos hormigones, como así también las características y propiedades que los mismos deben cumplir para ello.

En el Capítulo 3 se desarrollan los lineamientos del programa experimental que incluye la selección de distintos tipos de agregados (naturales y reciclados) los cuales se utilizaron para la elaboración de hormigones con matrices de tres niveles de resistencia. Sobre dichos hormigones se realizaron posteriormente los estudios del mecanismo de rotura en tracción. Asimismo se incluyen los detalles de las metodologías de ensayo empleadas para la caracterización de los agregados y los métodos de evaluación del comportamiento mecánico y del proceso de fractura en estos hormigones que fueron los mismos a los aplicados para evaluar tanto hormigones convencionales como otros casos especiales (hormigones de alta resistencia, hormigones expuestos a altas temperaturas).

En el Capítulo 4 se presentan las características de los agregados seleccionados para la elaboración de los hormigones, los cuales se comparan con otros agregados naturales y reciclados con el fin de tener un estudio más completo sobre las propiedades de los agregados. Se han efectuado, además de la resistencia, medidas de absorción, forma y distribución granulométrica.

En el Capítulo 5 se presenta un estudio comparativo del desarrollo de adherencia para los agregados utilizados, analizando morteros de diferentes razones agua/cemento (acorde a las utilizadas para la elaboración de los hormigones). Se evaluó la adherencia matriz-agregado, como así también la resistencia de la matriz y de los agregados.

En el Capítulo 6 se analiza el mecanismo de rotura en tracción de los hormigones para lo cual se evaluó la resistencia y deformabilidad en flexión sobre vigas entalladas, la resistencia a compresión diametral y, complementariamente, la resistencia a compresión. Además se analizó la estructura de cada hormigón considerando la distribución y el estado de los agregados e interfaces.

Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones y propuesta de estudios futuros, y el Capítulo 8 incluye las referencias de la bibliografía utilizada.

Capítulo 2

ANTECEDENTES Y NORMATIVAS

En este capítulo se desarrolla un estado del arte sobre las propiedades de los hormigones elaborados con agregados reciclados, en particular sobre la adherencia matriz-agregado y la influencia de ésta sobre el mecanismo de rotura del hormigón y en una segunda parte se realiza una comparación entre algunas de las recomendaciones existentes en el ámbito internacional, las cuales establecen los porcentajes máximos en que dichos agregados reciclados pueden emplearse como así también las características y propiedades que los mismos deben cumplir.

2.1. ANTECEDENTES E IMPORTANCIA DEL TEMA

La escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente la preservación del medio ambiente con la consecuente necesidad de disposición de los residuos, propician la búsqueda de nuevas opciones para el reciclado de materiales de desecho en el campo de la ingeniería civil. En este sentido el uso de hormigón triturado como agregado para la elaboración de nuevos hormigones aparece como una alternativa importante, particularmente en regiones densamente pobladas. En Europa en los últimos 15 años este “agregado reciclado” se ha usado mayoritariamente en la construcción de carreteras pero sólo el 1 % de los hormigones han sido elaborados con agregados reciclados. Entre otros antecedentes cabe citar los estudios realizados por la Building Contractors Society (Japón, 1978) y el reciclado de pavimentos en USA. El reporte del Comité del ACI (ACI, 2002) informa acerca de los procesos de obtención y propiedades de estos hormigones.

Como idea del interés e impacto del tema, en la Comunidad Europea la cantidad anual total de desechos de construcción y demolición estaba próxima a los 200 millones de toneladas en el año 2001. Asimismo en Estados Unidos para el año 2002 llegaba a alrededor de los 100 millones de toneladas. En Japón las dos terceras partes del hormigón demolido son recicladas como agregado para bases y sub-bases,

produciéndose alrededor de unas 400.000 tn/año de hormigón reciclado. España contó con un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (2001-2006) para el cual se destinaron unos 3.6 millones de Euros y en el que se exigió que en el período mencionado el 40 % de los agregados para la elaboración de hormigones debían provenir del reciclaje de desechos.

En nuestro país, en cambio, no se da la misma situación ya que se carece de algún tipo de normativa o recomendación para el empleo de materiales reciclados provenientes de desechos de construcción. Sin embargo la necesidad de disposición de residuos de la construcción en zonas densamente pobladas, como el Conurbano Bonaerense, justifica un estudio sistemático en el tema que nos ocupa.

Por ello, aunque diversos trabajos han demostrado la factibilidad del empleo de hormigón reciclado como agregado, con frecuencia fueron aplicados en hormigones de baja calidad. El mayor conocimiento de sus propiedades propiciará un uso más generalizado dando lugar a hormigones con niveles de resistencia y durabilidad similares a los exigidos para los hormigones con agregados naturales.

A continuación se presenta un resumen del estado del arte sobre la estructura a nivel material y las propiedades de los hormigones con agregado reciclado, incluyendo las características de la fase agregado y su influencia sobre las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón.

2.1.1. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

Entre otras características de los agregados que son significativas para el hormigón se destacan la granulometría, porosidad, absorción, densidad, forma y textura superficial, resistencia, módulo de elasticidad y presencia de sustancias nocivas. Estas propiedades son función de la composición mineralógica de la roca que les dio origen y de su microestructura, del tipo de exposición a la que estuvo sujeta y del equipo utilizado para producir el agregado.

Los agregados naturales comprenden más del 90 % del total de los agregados utilizados para la elaboración de hormigón. Asimismo se utilizan subproductos industriales tales como escoria de alto horno, ceniza volante, desperdicios municipales, hormigón reciclado, etc.

En principio y como condición necesaria, los hormigones elaborados con agregados reciclados procedentes de la trituración de hormigones, deberían alcanzar un nivel de calidad similar al de un hormigón elaborado con agregados de densidad normal. Por lo tanto, la utilización de agregados reciclados en la elaboración de nuevos hormigones plantea la necesidad de conocer sus propiedades a fin de obtener, fundamentalmente, un material resistente y durable.

En este caso se analizarán las propiedades de la fracción gruesa de los agregados reciclados debido a que en muchas oportunidades se observó una menor durabilidad de los hormigones con agregados finos reciclados, lo cual se atribuye principalmente al incremento del contenido de agua de las mezclas (Rasheeduzzafar and Khan, 1984, Loo. and Tam, 1987, Gómez-Soberón, 2002, Buyle-Bodin. and Hadjieva-Zaharieva, 2002, Sri Ravindrarajah, Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002). Al usar agregado fino natural la durabilidad del hormigón sería comparable a la del hormigón con agregado natural.

Con respecto a sus propiedades, el agregado reciclado presenta algunas características bien diferenciadas respecto a un agregado natural, observándose a primera vista una capa de mortero del hormigón original adherida a las partículas de roca, constituyéndose de esta forma una fase agregado heterogénea. Las características del agregado natural dependen principalmente de las características de la roca madre, mientras que las del agregado reciclado dependerán tanto de las características de la roca como de las del mortero del hormigón original. También pueden aparecer diferencias en función de las cantidades relativas en que estos dos elementos se presenten en el agregado.

Los agregados reciclados presentan, como características generales, una mayor porosidad, menor peso específico, mayor capacidad de absorción de agua, menor resistencia a compresión, menor módulo de elasticidad y menor resistencia a las acciones mecánicas (impacto, choque y abrasión). Esto se debe fundamentalmente a la presencia del mortero adherido al agregado original. Varios trabajos han demostrado que el contenido unitario de cemento, la relación agregado grueso/agregado fino, el tamaño máximo del agregado, tendrán una influencia importante sobre el contenido de mortero adherido. Asimismo tendrá influencia, en menor medida, la calidad del hormigón que se tritura.

Al mismo tiempo existen antecedentes que muestran que la adherencia en las interfaces matriz–agregado reciclado resulta mayor o al menos igual que la desarrollada con agregados naturales. Esta mayor adherencia en las interfaces cuando se utilizan agregados reciclados puede incidir sobre el mecanismo de falla del hormigón elaborado con este tipo de agregados, por lo cual su estudio resulta de gran interés.

Con respecto a la absorción de agua a 24 horas diversos investigadores (Hansen and Narud, 1983, Sri Ravindrarajah and Tam, 1985, Di Maio et al, 2001, Vázquez y Barra, 2002) evaluaron agregados obtenidos a partir de la trituración de hormigones de diferentes calidades (distinta razón agua/cemento). Obtuvieron valores de absorción para los agregados reciclados similares entre sí, alrededor del 5 %, los cuales resultaron muy superiores a los del agregado natural.

Sri Ravindrarajah et al (1987, 1988) evaluaron las características de un agregado reciclado proveniente de la trituración de hormigones de propiedades conocidas. Encontraron valores de absorción para el agregado reciclado de 5.7 % y para el agregado natural de 0.3 %. Resultados similares encontraron Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002), quienes evaluaron tanto la fracción fina como la gruesa de un agregado reciclado. Resaltaron que la alta absorción de agua fue la diferencia más importante en las características físicas de los agregados reciclados y naturales.

Por otra parte, Cúneo Simian y Durán (1995) determinaron la absorción de agua sobre tres agregados naturales, obteniendo valores entre 0.2 y 0.8 %. Asimismo determinaron la absorción de agregados reciclados obtenidos de la trituración de los hormigones elaborados con los agregados naturales anteriormente mencionados, alcanzándose valores superiores a los de los agregados naturales (entre 5.5 y 6.8 %).

Tavakoli y Soroushian (1996) experimentaron con dos agregados reciclados provenientes de la trituración de dos hormigones de diferentes orígenes. Los valores de absorción de agua determinados en los agregados reciclados fueron, en ambos casos, superiores a los del agregado natural.

Gómez et al (2001) encontraron que la absorción de los agregados reciclados es superior a la de los agregados naturales. Analizaron un agregado reciclado y encontraron que este agregado presentaba valores de absorción de aproximadamente 6 %, superiores a los del agregado convencional que fue del 1 %. Estos mismos

resultados obtuvo Gómez-Soberón (2002) sobre el agregado reciclado y natural analizados en su estudio.

Di Maio et al (2002) evaluaron un agregado reciclado obtenido de la trituración de un hormigón de razón agua/cemento 0.50 y determinaron su absorción, obteniendo un valor de 4.6 % para el agregado reciclado y de 0.5 % para el agregado natural. A estos mismos resultados arribó Zega (2003) para el agregado reciclado evaluado, el cual se obtuvo de la trituración de hormigones de desecho de diferentes características tecnológicas.

Hernández y Fornasier (2005) encontraron que la absorción de agua de dos agregados reciclados diferentes es 10 veces superior a la del agregado natural (piedra partida granítica). Limbachiya et al (2000) obtuvieron valores de absorción para los agregados reciclados 2 veces superior a la del agregado natural.

Katz (2003) evaluó la influencia de la edad de trituración del hormigón sobre la absorción de los agregados reciclados. Encontró valores de 3.2 % para la edad de 1 día y de 12 % a los 28 días.

Asimismo Poon et al (2004) evaluaron la absorción de agregados naturales y reciclados de 10 y 20 mm de tamaño nominal, obteniendo respectivamente 7.6 y 6.3 % para los agregados reciclados y 1.3 y 1.2 % para los agregados naturales.

Con respecto a la absorción de agua se puede concluir entonces que los porcentajes de absorción que presentan los agregados reciclados son muy superiores a la de los agregados naturales de densidad normal, lo cual está íntimamente relacionado con el mortero adherido sobre las partículas de agregado original. Asimismo, la capacidad de absorción de los agregados reciclados no se ve mayormente afectada por la razón agua/cemento del hormigón original.

Según Hansen y Narud (1983) los valores de densidad de los agregados reciclados en condición saturada a superficie seca (D_{ss}) son similares para las tres calidades de agregados reciclados que evaluaron (2.45 kg/dm^3). Estos fueron inferiores a la densidad del agregado natural (2.60 kg/dm^3). Al mismo resultado llegaron otros autores que evaluaron agregados reciclados de diferentes calidades (Sri Ravindrarajah and Tam, 1985, Di Maio et al, 2001, Vázquez y Barra, 2002).

Sri Ravindrarajah et al (1987, 1988) determinaron la densidad de un agregado reciclado y encontraron que ésta es menor que la del agregado natural. Cúneo Simian y Durán (1995) encontraron que esta diferencia es aproximadamente 10 % y Limbachiya et al (2000) que se encuentra entre 7 y 9 %.

Tavakoli y Soroushian (1996) determinaron las propiedades físicas de agregados naturales y reciclados. Obtuvieron valores de densidad saturada y superficie seca menores para los agregados reciclados (2.30 kg/dm^3 y 2.40 kg/dm^3) que para el agregado natural (2.65 kg/dm^3).

Asimismo Machado y Latterza (1997) encontraron que la densidad del agregado reciclado utilizado era más baja que la correspondiente a un agregado natural, observándose en este caso mayores diferencias.

Otros autores (Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002, Di Maio et al, 2002, Zega, 2003) analizaron las propiedades de los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones con agregados naturales y encontraron que tenían una densidad (D_{ss}) de aproximadamente 2.40 kg/dm^3 contra los 2.60 kg/dm^3 del agregado natural.

Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002) evaluaron la densidad seca (D_s) de un agregado reciclado obtenido de la trituración de hormigón de desecho. Observaron que la densidad del agregado reciclado es inferior a la del agregado natural. Los valores hallados fueron de 2.25 kg/dm^3 para el reciclado y de 2.68 kg/dm^3 para el natural.

Hernández y Fornasier (2005) evaluaron dos agregados gruesos reciclados de diferente origen, obteniendo densidades inferiores (8.5 y 11.5 % menor) a la del agregado granítico natural.

Asimismo Poon et al (2004) evaluaron agregados naturales y reciclados de distinto tamaño nominal. Observaron que la densidad de los agregados reciclados es aproximadamente un 10 % menor a la de los agregados naturales.

Se observa entonces que la densidad del agregado reciclado es menor que la correspondiente al agregado natural empleado en el hormigón convencional, debido a la presencia de mortero como parte constituyente del mismo e incluso la existencia de

partículas formadas enteramente por dicho mortero. Asimismo, los agregados reciclados producto de la trituración de hormigones de distinta razón agua/cemento presentan similares valores de densidad.

Algunos autores (Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002) evaluaron la porosidad total de los agregados y hallaron que fue aproximadamente del 3 % para el agregado natural mientras que para el agregado reciclado fue del 13.5 %. Valores similares obtuvieron Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002) quienes encontraron que la porosidad del agregado natural era del 0.3% mientras que para el agregado reciclado era del 12.5 %.

Vázquez y Barra (2002) indican porosidades del orden del 16 % para el agregado reciclado contra un 1.8 % del agregado natural, al igual que Poon et al (2004) quienes determinaron que la porosidad de los agregados reciclados es bastante superior que la de los agregados naturales.

Considerando sus propiedades se observa que la porosidad del agregado reciclado se encuentra por encima de la de un agregado natural de densidad normal debido al mortero poroso presente en las partículas del material reciclado.

En el ensayo de desgaste realizado sobre agregados reciclados provenientes de hormigones de diferente calidad varios investigadores (Hansen and Narud, 1983, Vázquez y Barra, 2002) hallaron variaciones según la calidad del agregado, produciéndose un aumento del porcentaje de desgaste a medida que la calidad del agregado reciclado disminuía. Encontraron que el agregado reciclado tenía un desgaste superior al del agregado natural, al igual que otros investigadores (Sri Ravindrarajah et al, 1988, Tavakoli and Soroushian, 1996, Buyle-Bodin and Hadjieva-Zaharieva, 2002).

Sri Ravindrarajah y Tam (1985), en cambio, encontraron que los valores de desgaste son similares para las tres calidades de agregados reciclados que evaluaron, del orden del 40 %, mientras que para el agregado natural obtuvieron un 18 %. Valores similares obtuvieron Gómez et al (2001).

Cúneo Simian y Durán (1995) hallaron que los agregados reciclados tenían mayores valores de desgaste que los agregados naturales, habiendo diferencias en los agregados reciclados según el tipo de agregado natural que le dio origen (canto

rodado, basalto, granito). A igual conclusión llegaron Hernández y Fornasier (2005) quienes obtuvieron una pérdida de peso por desgaste 70 y 110 % mayor en los agregados reciclados.

Di Maio et al (2002) encontraron que el desgaste es mayor para los agregados reciclados que para el agregado natural, teniendo valores de 32 y 28 % respectivamente. Zega (2003) obtuvo aún mayores diferencias entre los agregados naturales y reciclados.

Se puede concluir entonces que la presencia de mortero en los agregados reciclados da lugar a una mayor abrasión de las partículas, con aumentos considerables en la pérdida de peso de los agregados reciclados. No obstante en muchos casos los valores no exceden los límites de desgaste establecidos por el reglamento CIRSOC vigente (pérdida igual o menor que el 50 %, en el caso de hormigones expuestos a abrasión pérdida igual o menor al 30 %), ya que las partículas más débiles se eliminan durante el proceso de trituración.

Experiencias realizadas en el LEMIT (Zerbino, 1998 a, Giaccio and Zerbino, 1998) con diferentes agregados naturales comprobaron que los agregados con mayor absorción presentan una disminución en la resistencia, la cual fue estimada mediante un ensayo de carga puntual.

Metin Husem (2003) evaluó agregados de peso liviano (piedra caliza y arcillas expandidas) y los comparó con agregados de peso normal. Encontró que dichos agregados presentan una menor resistencia a compresión y un menor módulo de elasticidad. Estas propiedades fueron evaluadas sobre testigos de 75 x 150 mm tomados de las rocas utilizadas en la producción de los agregados.

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) evaluaron agregados obtenidos a partir de la trituración de hormigones de diferentes calidades (distinta razón agua/cemento) y obtuvieron una menor resistencia a las acciones mecánicas (impacto, abrasión y aplastamiento) del agregado reciclado respecto al agregado natural.

Poon et al (2004 a y b) evaluaron la influencia de la humedad de los agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón. Previamente caracterizaron los agregados utilizados (naturales y reciclados) de

acuerdo a los métodos de ensayo especificados en la norma británica BS 812, encontrando una disminución en la resistencia de los agregados reciclados

A pesar de la poca información en relación a este tema en agregados reciclados, se podría suponer que dichos agregados presentarán una menor resistencia y un menor módulo de elasticidad que los agregados naturales de densidad normal comúnmente utilizados.

Con respecto a la adherencia matriz-agregado existen diversos factores que la modifican. Como idea general la adherencia está íntimamente relacionada con la resistencia de la matriz, sin embargo existen otros factores propios del agregado que la modifican en mayor o menor grado.

Varios trabajos (Giaccio et al, 1985, Giaccio et al, 1990, Giaccio y Zerbino, 1997, Zerbino, 1998 a y b, Giaccio and Zerbino, 1998) informan que la textura superficial de los agregados tiene una incidencia fundamental sobre la adherencia matriz-agregado. Agregados con textura áspera desarrollan mayor adherencia con la matriz que los agregados de superficie lisa. Las superficies fracturadas poseen en general mayor adherencia que las cortadas, aunque sus valores varían considerablemente con el tipo de roca. Las diferencias de adherencia originadas en el cambio de la textura superficial de un mismo agregado pueden resultar mayores que las encontradas entre distintos agregados.

Akçaoğlu et al (2002, 2004) observaron que las propiedades de los agregados influyen sobre las características de las interfaces matriz-agregado. El alto módulo de elasticidad, la textura superficial lisa y el mayor tamaño de los agregados crean interfaces más débiles. Observaron en general un aumento en la adherencia matriz-agregado para una textura superficial áspera y para un agregado de forma irregular. Agregados de superficie lisa y forma redondeada dieron como resultado una adherencia matriz-agregado más débil.

Otros estudios muestran que en el caso de agregados naturales con elevada absorción la adherencia relativa de las interfaces matriz-agregado puede incrementarse en forma considerable (Metin Husem, 2003).

En relación a los cambios en las características de los agregados, Rasheeduzzafar y Khan (1984) han encontrado una mayor adherencia

mortero-agregado en el caso de emplear como agregados hormigón reciclado triturado, lo cual está íntimamente relacionado con la mayor absorción y la textura superficial más rugosa de los agregados reciclados.

Poon et al (2004) determinaron que las interfaces matriz-agregado en hormigón con agregado natural son poco compactas y de ancho variable, al igual que en hormigón elaborado con agregado reciclado proveniente de un hormigón de resistencia normal. En el caso de hormigón elaborado con agregado reciclado proveniente de un hormigón de alta resistencia las interfaces matriz-agregado son más densas, lo que podría suponer una mayor adherencia matriz-agregado.

Se puede asumir entonces una mejor adherencia relativa de las interfaces en agregados reciclados debido a la mayor rugosidad que presentan dichos agregados.

2.1.2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN RECICLADO

Las características de los agregados influyen sobre las propiedades del hormigón. Debido a que los agregados reciclados presentan diferencias con respecto a los agregados naturales, principalmente mayor absorción de agua y porosidad, adquiere interés el estudio del comportamiento de los hormigones elaborados con este tipo de agregados, tanto en estado fresco como endurecido.

2.1.2.1. ESTADO FRESCO

Las propiedades del hormigón en estado fresco pueden modificarse si se modifican las propiedades de los materiales componentes. Por lo tanto si se utilizan agregados reciclados para la elaboración del hormigón este puede sufrir modificaciones en relación al hormigón convencional de características similares, principalmente debido a la mayor capacidad de absorción de agua y mayor porosidad de dichos agregados.

La trabajabilidad es una característica del hormigón fresco que considera la "facilidad de colocación" y "la resistencia a la segregación". Se define como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular el hormigón fresco con una pérdida mínima de homogeneidad. Es una propiedad compuesta por la consistencia, que describe la facilidad de fluir, y la cohesividad, que describe la tendencia a la segregación.

Dicha propiedad es controlada por el contenido de agua, el contenido de cemento, las características del agregado, aditivos y otros factores que afectan la pérdida de asentamiento. Con respecto a los agregados naturales, el bajo coeficiente de absorción efectivo de la mayoría de ellos determina que prácticamente no se produzcan cambios en la trabajabilidad debido a variaciones en la demanda de agua a causa de la absorción de los agregados.

Por el contrario, debido a la mayor porosidad y capacidad de absorción de agua de los agregados reciclados con respecto a los agregados naturales, se pueden producir modificaciones importantes en la trabajabilidad de las mezclas con ellos elaboradas si la absorción de los agregados no es tomada en cuenta.

Vázquez y Barra (2002) concluyeron que los agregados reciclados absorben una cierta cantidad del agua de mezclado ya que poseen un elevado coeficiente de absorción. La cantidad de agua que el agregado puede succionar depende de su condición inicial de humedad y del tiempo en que permanece en contacto con el agua.

Varios trabajos han demostrado que si el agregado reciclado es utilizado en condición de humedad natural habrá que incorporar una mayor cantidad de agua de mezclado, en función de la capacidad de absorción, para lograr valores de asentamiento semejantes al de los hormigones con agregados naturales, (Hansen and Narud, 1983, Rasheeduzzafar and Khan, 1984, Sri Ravindrarajah and Tam, 1985).

Sri Ravindrarajah et al (1987, 1988) elaboraron hormigones empleando los agregados en estado de humedad natural y ajustaron la cantidad de agua de mezclado de los hormigones reciclados en función de la absorción de los agregados hasta la condición de saturado y superficie seca. Encontraron valores de asentamientos comparables a los obtenidos en las mezclas con agregados graníticos naturales.

Hernández y Fornasier (2005) realizaron mezclas con diferentes contenidos de cemento (300, 350 y 400 kg/m³) para cada agregado reciclado y para el agregado natural. Para las mezclas con menor contenido de cemento (300 y 350 kg/m³), las elaboradas con los agregados reciclados requirieron una mayor demanda de agua que la mezcla patrón para alcanzar un mismo asentamiento. En el caso de las mezclas con 400 kg/m³ de cemento aumentó la demanda de aditivo plastificante para las mezclas con agregado reciclado manteniendo constante la cantidad de agua.

Para que no se produzcan cambios en la trabajabilidad debido a variaciones en la demanda de agua a causa de la absorción de los agregados se puede utilizar el agregado reciclado saturado. Esta práctica conduce a que las diferencias de absorción entre agregados naturales y reciclados no modifiquen la demanda de agua y en consecuencia la trabajabilidad de las mezclas. Por lo tanto si se emplea el agregado reciclado en estado saturado los valores de asentamiento serán similares al de los hormigones con agregados naturales.

En experiencias realizadas en el LEMIT (Di Maio et al, 2001) con agregados gruesos reciclados saturados los cuales se sumergieron en agua durante las 24 horas previas a la elaboración de los hormigones se obtuvieron asentamientos comparables a los de los hormigones con agregados naturales. A resultados similares llegaron Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002) quienes también humedecieron previamente los agregados antes de la elaboración del hormigón

Poon et al (2004) evaluaron la influencia de la humedad de los agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco utilizando los agregados reciclados secos al aire, en estufa y saturados y superficie seca. Observaron que los valores de asentamiento de las mezclas dependen del contenido inicial de agua de los agregados. Para los hormigones elaborados con los agregados en estado saturado no existieron diferencias en los valores de asentamiento inicial ni en la pérdida en el tiempo en ninguna de las mezclas. Cuando emplearon los agregados en estado seco (al aire o en estufa) se debió incorporar una mayor cantidad de agua de mezclado lo cual hizo que los asentamientos iniciales resultaran diferentes. Con respecto a la variación en el tiempo observaron una leve pérdida de asentamiento en el caso de las mezclas con agregados naturales, hecho que no ocurrió con los hormigones reciclados debido al mayor contenido de agua inicial.

Por lo tanto la mayor capacidad de absorción de agua de los agregados reciclados con respecto a los agregados naturales puede producir modificaciones en la trabajabilidad de los hormigones reciclados. Se deberá entonces presaturar los agregados o ajustar la cantidad de agua de mezclado teniendo en cuenta la absorción que presenten los agregados. Asimismo es posible aumentar la dosis de aditivo utilizada en el hormigón reciclado manteniendo constante la cantidad de agua.

Al igual que la trabajabilidad, el peso de la unidad de volumen del hormigón fresco (PUV) se ve influenciado por las características de los agregados. Las

diferencias en las características de los agregados reciclados, principalmente su menor densidad debida al mortero adherido a las partículas de agregados, se ven traducidas en disminuciones del PUV con respecto a mezclas elaboradas con agregados naturales.

Hansen y Narud (1983) hallaron que el PUV de los hormigones con agregados reciclados es menor que en los hormigones con agregados naturales. Sri Ravindrarajah y Tam (1985) obtuvieron diferencias de entre 50 y 100 kg/m³. Asimismo Hernández y Fornasier (2005) obtuvieron valores menores que en las mezclas convencionales.

Katz (2003) evaluó hormigones elaborados con agregados reciclados obtenidos para diferentes edades de trituración del hormigón original, alcanzando valores de PUV de aproximadamente 2150 kg/m³ para los hormigones reciclados, menores que los valores obtenidos para el hormigón convencional.

Por lo tanto, la menor densidad que presentan los agregados reciclados se ve traducida en una disminución del peso unitario del hormigón, siendo mayor a medida que aumenta el porcentaje de agregado reciclado incorporado al mismo.

Con respecto al aire naturalmente incorporado en el hormigón Hansen y Narud (1983) obtuvieron porcentajes similares para el hormigón convencional y reciclado. Di Maio et al (2001), en cambio, encontraron valores superiores para los hormigones reciclados, al igual que Hernández y Fornasier (2005). Asimismo Katz (2003) observó que el porcentaje de aire en los hormigones reciclados (4 a 5.5 %) es superior al del hormigón de referencia (1.5 %), advirtiendo que la causa por la que se produce este aumento no es del todo clara.

Podría concluirse que el empleo de agregados gruesos reciclados puede incrementar el contenido de aire naturalmente incorporado en los hormigones con ellos elaborados, lo cual podría atribuirse a la mayor cantidad de mortero.

2.1.2.2. ESTADO ENDURECIDO

El hormigón es un material heterogéneo donde una matriz porosa rodea a un conjunto de inclusiones (agregados) de distinta rigidez y tamaño, distribuidos en forma aleatoria. Las propiedades de un material se originan en su estructura interna y

pueden modificarse si se producen cambios en las propiedades de las fases componentes (matriz, agregados y zonas de transición). Los agregados tienen una influencia significativa sobre el peso unitario, el módulo de elasticidad y la estabilidad dimensional del hormigón. Factores como la porosidad, forma y textura del agregado grueso afectan dichas propiedades.

La zona de transición, generalmente el eslabón más débil de la cadena, es considerada como la fase de resistencia límite del hormigón. Debido a la presencia de la zona de transición el hormigón falla en un nivel de carga considerablemente más bajo que la resistencia de sus dos componentes principales (matriz y agregados). La estructura de la zona de transición, especialmente el volumen de huecos y microgrietas presentes, tiene una gran influencia en la rigidez del hormigón.

Por lo tanto las características de los agregados y de las zonas de transición influyen sobre las propiedades del hormigón endurecido. Debido a esto adquiere interés el estudio del comportamiento de los hormigones elaborados con este tipo de agregados, teniendo en cuenta tanto el comportamiento mecánico como las propiedades de transporte, estas últimas relacionadas con la durabilidad del hormigón.

2.1.2.2.1. Propiedades físicas

La durabilidad del hormigón está relacionada con los distintos mecanismos de transporte que gobiernan su comportamiento frente a distintos ambientes agresivos. Estos dependen tanto del tamaño de los poros como de su conectividad, o sea son controlados por la permeabilidad del hormigón. Por lo tanto, desde el punto de vista de la durabilidad, resulta importante la porosidad de la pasta, la de los agregados y fundamentalmente la de la zona de transición.

Existen distintos métodos que permiten evaluar aquellas propiedades de los hormigones que se encuentran directamente relacionadas con la facilidad con la que los agentes agresivos ingresan y se mueven en el interior de la estructura porosa del hormigón. Se recurre entonces a su estudio a través de índices que tienen en cuenta un determinado mecanismo de transporte, como ser la absorción de agua, la absorción capilar, la penetración de agua a presión y la permeabilidad.

Debido a que la capacidad de absorción de los hormigones está gobernada por la porosidad del mortero, para el caso de los hormigones reciclados dependerá de las

porosidades del nuevo mortero y del mortero del hormigón original que forma parte de los agregados reciclados, por lo cual se tendrán mayores valores de absorción y menores valores de densidad en los hormigones reciclados (Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002). Estos cambios fueron mayores a medida que aumentó el contenido de agregados reciclados.

Taus (2003) observó que las absorciones de los hormigones reciclados resultaron mayores que la de los hormigones elaborados con agregados naturales. Este hecho puede atribuirse a la mayor absorción de los agregados reciclados frente a los agregados naturales. Katz (2003) indicó que en hormigón reciclado se tiene una mayor absorción con respecto al hormigón con agregado natural, al contrario de Sagoe-Crentsil et al (2001) quienes no observaron grandes diferencias en la absorción de agua. Hernández y Fornasier (2005) encontraron que el hormigón reciclado es un material más poroso, con aumentos de la absorción de agua, al igual que Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002).

Zega y Taus (2005) evaluaron un hormigón con agregados naturales y hormigones reciclados en forma sucesiva. Hallaron que la densidad de los hormigones disminuye con cada ciclo de reciclado. Con respecto a la absorción de agua observaron un incremento importante de la misma para el primer ciclo, manteniéndose aproximadamente constante a partir del segundo ciclo. Los valores finales de absorción y densidad (último ciclo) se aproximaron al correspondiente a un mortero, debido a que la cantidad total de mortero presente en los agregados reciclados se incrementa en los sucesivos ciclos de reciclado.

Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002) realizaron el ensayo de absorción capilar sobre muestras de hormigones reciclados y convencionales, hallando que los hormigones reciclados tenían una absorción inicial aproximadamente 4 veces mayor que la de los hormigones convencionales, con lo cual la penetración de líquidos sería más rápida y significativamente más vulnerables a los ataques de los agentes exteriores que los hormigones convencionales.

Taus (2003), considerando a la absorción capilar como uno de los parámetros indicadores de la durabilidad, observó que para hormigones de alta resistencia las absorciones capilares determinadas fueron prácticamente coincidentes. Las diferencias más importantes se produjeron para hormigones de bajos niveles

resistentes (razón agua/cemento 0.60) en donde las absorciones capilares de los hormigones con agregados reciclados son más elevadas.

Zega y Taus (2005), para los hormigones sometidos a reciclados sucesivos, determinaron que la capacidad y velocidad de absorción capilar aumentan, haciéndose más notable este incremento a partir del segundo ciclo de reciclado.

Villagrán et al (2005) evaluaron las propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados. Hallaron que las capacidades de absorción capilar son mayores en los hormigones reciclados, al igual que Hernández y Fornasier (2005) quienes encontraron mayores valores de capacidad y velocidad de absorción capilar.

Con respecto a la penetración de agua a presión Zega y Taus (2005) encontraron que ésta depende del tipo de curado, sin tener marcada influencia la calidad del agregado empleado. Asimismo Hernández y Fornasier (2005) obtuvieron valores de penetración de agua a presión similares para los hormigones con agregados naturales y reciclados.

En muchos casos se informa que la permeabilidad es mayor en hormigones con agregados reciclados. Esto debe atribuirse principalmente al incremento de los contenidos de agua de las mezclas, en especial si también se emplea árido fino reciclado. Hansen (1986) indica permeabilidades de 2 a 5 veces mayores a las obtenidas con agregados naturales.

Por lo tanto puede esperarse una menor durabilidad de los hormigones elaborados con agregados reciclados a medida que aumenta el porcentaje de agregado reciclado empleado. Esta reducción de calidad, dada por los cambios en los parámetros relacionados con los distintos mecanismos de transporte en el hormigón endurecido, puede atribuirse a numerosas causas, principalmente la mayor porosidad de los agregados reciclados.

2.1.2.2.2. Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico del hormigón dependerá de la resistencia de la matriz de cemento, la cual será función, entre otros factores de la relación agua/cemento, el contenido y tipo de cemento y el grado de hidratación alcanzado. Asimismo tendrá influencia el agregado utilizado en la elaboración del hormigón y las

características de la zona de transición, siendo significativo el tipo de agregado, forma y textura superficial, limpieza y resistencia.

Los agregados naturales son generalmente densos y resistentes por lo que la porosidad de la pasta de cemento y de la zona de transición son las que determinan las características mecánicas del hormigón. Sin embargo, debido a que el agregado reciclado presenta características diferenciadas respecto al agregado natural, es importante estudiar su influencia sobre el comportamiento mecánico del hormigón.

Diversos estudios demuestran que la resistencia a compresión de los hormigones con agregados reciclados disminuye con respecto a la resistencia del hormigón con agregados naturales. Estas modificaciones de resistencia se producen en especial cuando se emplean altos porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado. Asimismo muestran que para ciertos porcentajes de reemplazo la resistencia a compresión se mantiene aproximadamente constante con respecto al hormigón original (Di Maio et al, 2001, Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002, Di Maio et al, 2002).

En relación al comportamiento de la resistencia en función de la razón agua/cemento, Rasheeduzzafar y Khan (1984) han encontrado ciertas diferencias. Observaron que para razones agua/cemento mayores a 0.45 la resistencia del hormigón reciclado resultó del mismo orden, mientras que para razones agua/cemento menores a 0.45 resultó menor (aproximadamente 30 %) que en el hormigón con agregados naturales.

Hernández y Fornasier (2005) hallaron que los niveles de resistencia a compresión de hormigones con agregados reciclados son comparables a los de hormigones elaborados con agregados naturales para razones agua/cemento elevadas, mientras que para bajas razones agua/cemento la resistencia a compresión disminuye.

Hansen y Narud (1983) elaboraron hormigones de tres razones agua/cemento diferentes con tres tipos de agregados reciclados obtenidos de hormigones de diferente calidad. Emplearon los agregados gruesos reciclados en estado de humedad natural y en condición saturada y superficie seca. Obtuvieron en los hormigones reciclados valores de resistencia a compresión y una variación de la resistencia con la

razón agua/cemento similares a la de los hormigones con agregados naturales, en contrapartida con los resultados anteriores.

Zega et al (2005) hallaron en hormigones sometidos a reciclados sucesivos una resistencia a compresión similar a la del hormigón a partir del cual se obtuvieron los agregados reciclados.

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) llegaron a la conclusión que la menor resistencia que presentaron los hormigones reciclados puede atribuirse a distintas causas como la mayor porosidad total del hormigón reciclado respecto a la del hormigón original, la menor resistencia del agregado reciclado a las acciones mecánicas y la mayor cantidad de áreas de unión frágiles en el hormigón reciclado que en el hormigón original, sin tener influencia la calidad del hormigón a partir del cual se obtuvieron los agregados reciclados. Asimismo, en conjunto con Loo (1987, 1988) comprobaron que la resistencia a compresión del hormigón reciclado es 10 % menor que la del hormigón convencional. La variación de la resistencia con la razón agua/cemento de los hormigones reciclados resultó similar a la de los hormigones convencionales.

Katz (2003) encontró una disminución en la resistencia a compresión en los hormigones reciclados, sin haber diferencias para los distintos agregados reciclados utilizados.

Poon et al (2004) observaron que en hormigón reciclado la resistencia a compresión es menor que en hormigón con agregado natural. Esta diferencia disminuye cuando el agregado reciclado proviene de un hormigón de alta resistencia. Asimismo, en trabajo conjunto con Fok y Kou (2004), evaluaron la influencia de la humedad de los agregados reciclados sobre las propiedades del hormigón. El hormigón elaborado con agregados reciclados secados al aire alcanzó valores de resistencia más altos, mientras que los hormigones elaborados con agregados secados en estufa y saturados alcanzaron valores de resistencia similares. Los resultados sugirieron como óptimo un 50 % de reemplazo de agregado natural por reciclado.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2005) encontraron que la resistencia de los hormigones reciclados disminuye con respecto a la del hormigón convencional, al igual que Tam et al (2005). Asimismo, Sagoe-Crentsil et al (2001) hallaron una disminución

de la resistencia a compresión en el hormigón reciclado del 5 % con relación al hormigón con agregado natural.

Puede observarse que, hasta ciertos porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, la resistencia a compresión resulta similar a la del hormigón convencional. Para porcentajes de reemplazo superiores pueden alcanzarse niveles de resistencia diferentes dependiendo fundamentalmente de la calidad del agregado reciclado (función de la calidad del hormigón original a partir del cual se obtuvieron los agregados reciclados) y de la razón agua/cemento del nuevo hormigón. Con respecto a este último punto los niveles de resistencia a compresión alcanzados en los hormigones con agregados reciclados resultan comparables a los de hormigones elaborados con agregados naturales para razones agua/cemento elevadas, mientras que para bajas razones agua/cemento la resistencia a compresión disminuye.

Simultáneamente se ha observado que la resistencia a tracción de los hormigones reciclados es inferior a la de los hormigones elaborados con agregados naturales, ampliándose dicha diferencia al incrementarse el porcentaje de agregado reciclado (Di Maio et al, 2001, Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002).

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) hallaron que la resistencia a tracción de los hormigones reciclados se encuentra en un rango de ± 15 % de la correspondiente a los hormigones convencionales.

Sri Ravindrarajah et al (1987) indican, al igual que otros investigadores (Sagoe-Crentsil et al, 2001, Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002, 2005), que la variación de la razón agua/cemento tiene mayor influencia sobre la resistencia a compresión que sobre la resistencia a tracción y que las disminuciones de resistencia resultan mayores en compresión que en tracción, esto puede asociarse a mejoras a nivel de la estructura interna del material (interfaces, segregación, defectos en general).

Tavakoli y Soroushian (1996) encontraron que la resistencia a tracción de los hormigones reciclados se ve afectada de manera diferente por el tamaño máximo del agregado que la resistencia a tracción del hormigón convencional. Mientras el tamaño del agregado no afecta la resistencia a tracción del hormigón reciclado, un incremento en el tamaño máximo del agregado natural conduce a una alta resistencia a tracción.

Con respecto a la resistencia a flexión se ha observado un comportamiento similar a su comportamiento en el ensayo de tracción, es decir, presenta un menor módulo de rotura que el hormigón convencional (Sri Ravindrarajah et al, 1987). Sri Ravindrarajah y Tam (1985) indican, al igual que otros autores (Hansen, 1986, Tavakoli and Soroushian, 1996), que parte de las diferencias en la resistencia a flexión observadas pueden atribuirse a la mayor adherencia de interfaces combinada con cambios en el contenido de mortero.

Katz (2003) con relación al módulo de rotura en flexión del hormigón, determinó que este es menor que el de un hormigón convencional, al igual que Hernández y Fornasier (2005).

En general se observa que la variación de la resistencia a tracción de los hormigones reciclados con la razón agua/cemento es similar a la que se produce en los hormigones convencionales y que las disminuciones de resistencia resultan mayores en compresión que en tracción, lo cual puede atribuirse a la mayor adherencia matriz-agregado.

En materiales heterogéneos como el hormigón, tanto el agregado como la pasta de cemento y las características de la zona de transición afectan el módulo de elasticidad. Entre las características del agregado la porosidad es el factor más importante. Esto se debe a que la porosidad del agregado determina su rigidez, la que a su vez controla la capacidad del agregado para restringir las deformaciones de la matriz. Con respecto al volumen de agregados se observa que cuanto mayor sea la cantidad de agregado grueso denso (alto módulo de elasticidad) mayor será el módulo de elasticidad del hormigón. Otras propiedades del agregado también influyen en el módulo de elasticidad del hormigón. El tamaño máximo, la forma y la textura superficial, la granulometría y la composición mineralógica, pueden influir en el microagrietamiento de la zona de transición y por lo tanto modificar la forma de la curva esfuerzo-deformación.

Más allá de la influencia sobre la resistencia del hormigón, la mayoría de los autores coincide en que los efectos del uso de agregados reciclados son más importantes sobre la rigidez del hormigón. Se encontraron fuertes caídas en el módulo de elasticidad (Sri Ravindrarajah et al, 1987, Di Maio et al, 2001, Gómez et al, 2001, Gómez-Soberón, 2002, Di Maio et al, 2002), la cual resulta más notoria al incrementar

el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, debido a la menor rigidez y densidad de este último.

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) obtuvieron que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado era aproximadamente un 15 % menor que el módulo del hormigón original. Sugirieron que dicha reducción del módulo es esperada debido al menor módulo del agregado reciclado respecto al agregado natural.

Katz (2003) halló una disminución en el módulo de elasticidad de hormigones reciclados, menor a medida que aumentaba la edad de trituración de los agregados (entre 50 y 63 % del módulo del hormigón de referencia). Rasheeduzzafar y Khan (1984) encontraron que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado era un 18 % menor que el correspondiente al hormigón convencional, diferencia que disminuía con el aumento de la razón agua/cemento.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2002) observaron que para hormigón elaborado con agregado reciclado el módulo de elasticidad disminuye, obteniendo valores entre un 8 y 11 % menores al módulo de elasticidad de hormigones convencionales de igual nivel resistente. En trabajos posteriores (2005) encontraron de igual forma una disminución del módulo de elasticidad de los hormigones reciclados.

Zega et al (2005) observaron que el módulo de elasticidad de los hormigones reciclados va disminuyendo con los sucesivos ciclos de reciclado, hecho que puede ser atribuido a la menor rigidez que adquieren los agregados en su continuo proceso de trituración.

Respecto a la deformabilidad del material Hansen y Narud (1983) atribuyen los cambios al mortero adherido que forma parte del agregado, al igual que Sri Ravindrarajah et al (1987). El empleo de agregados reciclados lleva a una mayor capacidad de deformación de los hormigones. Hernández y Fornasier (2005) determinaron que la deformabilidad del hormigón reciclado aumenta, con reducciones del módulo de elasticidad del 25 al 30 %.

Cabe resaltar entonces, que los hormigones reciclados presentan un menor módulo de elasticidad que los hormigones convencionales, debido principalmente a la menor rigidez de los agregados reciclados. Asimismo se destaca que los cambios

producidos en la rigidez del hormigón no siempre son verificados en la resistencia a compresión.

Estudios sobre la resistencia y deformabilidad en compresión de hormigón reciclado demuestran que los cambios en rigidez son más importantes que los registrados en la resistencia a compresión. Estos hechos permiten suponer que pueden existir cambios en el mecanismo de rotura del hormigón con agregados reciclados, particularmente si se elevan los niveles de resistencia.

Algunos autores demostraron que la cantidad de áreas de debilidad en el hormigón reciclado era mayor que en el hormigón original debido a que la resistencia a las acciones mecánicas de los agregados reciclados es menor que la del agregado original (Sri Ravindrarajah and Tam, 1985, Sri Ravindrarajah et al, 1987).

Asimismo varios trabajos han demostrado el rol de las interfaces en el comportamiento mecánico del hormigón y la incidencia de la resistencia relativa de las fases componentes (mortero y agregado). Los efectos al nivel de las interfaces justifican diferencias en el mecanismo de falla de hormigones convencionales y de alta resistencia (Zerbino, 1998 a y b, Giaccio and Zerbino, 1998,).

Las características particulares del agregado reciclado favorecen una mayor adherencia en las zonas de transición. Esto se debe a varios factores, principalmente a la textura porosa de los agregados reciclados la cual favorece la absorción de la pasta y a las menores diferencias de rigidez entre matriz y agregados con respecto a un hormigón convencional hecho que disminuye la concentración de esfuerzos.

Según Rasheeduzzafar y Khan (1984) la adherencia matriz-agregado en hormigón reciclado es mayor o al menos igual a la obtenida en hormigones elaborados con agregados naturales. Asimismo indican que en hormigón con agregados reciclados las fisuras se propagan por las interfaces mortero-agregado o a través del mortero con similar frecuencia. Para bajas razones agua/cemento la resistencia de la matriz y la adherencia mortero-agregado del nuevo hormigón superan la resistencia de las partículas de agregado, definida por la resistencia del mortero reciclado y la de sus interfaces, provocando la formación de fisuras a través de los agregados reciclados modificando el mecanismo de rotura del hormigón.

Tam et al (2005) observaron que si el mezclado se realiza en dos etapas se desarrollan interfaces más fuertes y por lo tanto aumenta la resistencia como asimismo mejora el comportamiento mecánico del hormigón.

Nagataki et al (2004) informaron que el uso de agregados reciclados modifica la microestructura del material y por lo tanto sus propiedades. Hallaron que los hormigones reciclados presentan igual o mejor comportamiento mecánico que los hormigones con agregado natural.

Akçaoğlu et al (2002, 2004) observaron que el alto módulo de elasticidad, la textura superficial lisa y el mayor tamaño de los agregados crean interfaces más débiles, y consecuentemente influyen sobre el proceso de fractura del hormigón. Estas características tienen mayor importancia para bajas razones agua/cemento. Este hecho es consistente con lo observado en hormigones con distintos tipos de agregados naturales y adherencia de interfaces (Giaccio and Zerbino 1998, García-Álvarez et al 2003)

Por lo tanto se puede concluir que comparado con un hormigón con agregados naturales e igual relación agua/cemento, los hormigones con agregados gruesos reciclados presentan un comportamiento similar a los hormigones con agregados naturales en lo que respecta a la resistencia a tracción o compresión. No obstante, hormigones con resistencia similar evidencian diferencias significativas sobre el proceso de inicio y propagación de fisuras, debido a la mayor adherencia de interfaces y a la menor resistencia de dichos agregados. Estos cambios en las propiedades del hormigón influirán sobre su mecanismo de rotura, disminuyendo la energía y el tamaño de la zona de fractura.

2.1.3. CONCLUSIONES

Del análisis de la bibliografía consultada surge que es posible elaborar hormigones con agregados reciclados que presenten un comportamiento similar respecto de los hormigones con agregados naturales, ya sea en cuanto a resistencia y durabilidad. Los antecedentes muestran que el uso de agregados reciclados puede requerir incrementos en el contenido de agua de las mezclas, pero si sólo se emplean la fracción gruesa del agregado las diferencias son mínimas. Con respecto a la durabilidad, los cambios en la demanda de agua pueden compensarse presaturando los agregados. En tal situación los efectos más importantes del uso de hormigón

triturado como agregado reciclado se relacionarán con la deformabilidad del hormigón y con cambios en el mecanismo de fractura.

2.2. ESTUDIO DE NORMAS Y REGLAMENTOS

Para que un material de desecho pueda ser empleado en la elaboración de hormigones, como es el caso particular de hormigones triturados que se utilizan como agregados, es necesario conocer previamente sus propiedades. En el caso de los agregados naturales sus propiedades dependen de las características de la roca original a partir de la cual se obtuvieron. Para los agregados reciclados esta situación es más compleja ya que la constitución que presentan estos agregados, donde aparece mortero adherido a la roca natural o formando partículas por sí solos, hace que sus propiedades estén influenciadas no solamente por los rasgos propios de la roca sino también por las características de ese mortero que proviene del hormigón que dio origen a dichos agregados.

Como se ha visto en el estado del arte desarrollado, las propiedades de los agregados reciclados son diferentes a las de los agregados naturales. Se observa una mayor porosidad, menor densidad, mayor capacidad de absorción de agua y menor resistencia mecánica, debido a la presencia del mortero adherido al agregado original. Esta situación provoca modificaciones en las características de las mezclas en estado fresco como así también en las propiedades mecánicas y durables del hormigón endurecido.

Debido a ello hay países que cuentan con recomendaciones o códigos que establecen los porcentajes en que dichos agregados reciclados pueden emplearse en la elaboración de nuevos hormigones sin afectar sus propiedades con relación a las de los hormigones con agregados naturales, como así también las características y propiedades que los mismos deben cumplir para ello.

En este estudio se realiza una comparación entre algunas de las recomendaciones existentes en el ámbito internacional (no existen a nivel nacional) referidas al empleo de los agregados reciclados y de los hormigones con ellos elaborados.

2.2.1. NORMAS Y/O REGLAMENTOS SELECCIONADOS

Son pocos los países que cuentan con alguna legislación que permita la utilización de agregados reciclados, y más aún que tengan alguna recomendación o código que especifique las condiciones que el mismo debe cumplir cuando se emplea en la elaboración de nuevos hormigones.

A lo mencionado debe agregarse el hecho que la mayoría de los países que se enmarcan dentro de los comentarios mencionados en el párrafo anterior pertenecen a la Comunidad Europea y que en América Latina no se cuenta con recomendaciones relacionadas con este tema. Por lo tanto las normas o recomendaciones seleccionadas son:

- German Committee for Reinforced Concrete (DafStb), “Code: Concrete with Recycled Aggregates”
- RILEM Recommendation: 121-DRG "Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates"
- Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción Española Hormigón Estructural (EHE), “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados”, Anexo 19

El Código Alemán DafStb se encuentra dividido en dos secciones. La primera trata sobre las particularidades referidas a la producción y manejo del hormigón en estado fresco, lo cual debe ser cumplimentado durante el proceso de elaboración. La segunda sección indica los requerimientos que deben cumplir los agregados reciclados, a los cuales se les exige que satisfagan los mismos establecidos para los agregados naturales de densidad normal empleados en la elaboración de hormigones, según la Norma DIN 4226 (Aggregate for Concrete: Items, Marking and Requirements), y ciertos requisitos adicionales. Asimismo no pone restricciones al empleo de la fracción fina reciclada menor a 2 mm, señalando que se le debe exigir los mismos requisitos que a las arenas naturales.

La recomendación RILEM hace referencia a las propiedades y características que deben reunir los agregados reciclados mayores a 4 mm, para lo cual hace una clasificación previa en función de la composición de los mismos según los contenidos de agregado natural, hormigón de desecho y material de mampostería que presenten.

Asimismo indica el campo de aplicación para el hormigón elaborado con cada una de dichas clases de agregados reciclados, en términos del tipo de exposición y la clase resistente, de acuerdo con el Eurocódigo 2 (Diseño de Estructuras de Hormigón).

La Recomendación Española se encuentra dividida en dos partes al igual que las anteriores. La primera hace referencia a las propiedades que se le exigen al agregado grueso reciclado, descartando el empleo de la fracción fina reciclada, mientras que la segunda establece los requisitos que deben cumplir los hormigones elaborados con un máximo de 20 % de agregado reciclado. Para mayores porcentajes indica que se deberán realizar los estudios específicos según la aplicación del hormigón.

2.2.2. REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS RECICLADOS

En la Tabla 2.1 se presentan los parámetros que deben tenerse en cuenta, según el Código Alemán DafStb al momento de caracterizar y evaluar a los agregados reciclados para su uso en hormigones, como así también la metodología a emplear para ello.

En la Tabla 2.2 se especifican los requisitos solicitados en la recomendación RILEM, los cuales están dados en función de cómo clasifica a los agregados reciclados según el contenido y tipo de material de desecho que contengan:

- **Tipo I:** agregados originados en los escombros de mampostería
- **Tipo II:** agregados que se originan en los escombros de hormigón
- **Tipo III:** combinación de agregados naturales y reciclados

El agregado Tipo III debe cumplir los siguientes requisitos adicionales: contenido mínimo de agregado natural 80 % y contenido máximo de agregado Tipo I 10 %. Asimismo especifica requisitos adicionales para los agregados reciclados (AR), iguales a los solicitados en agregados naturales (AN), los cuales no son obligatorios a menos que se especifiquen en los documentos nacionales o en los estándares CEN.

La Recomendación Española contempla los requisitos indicados en la Tabla 2.3 para los agregados reciclados, limitando los mismos a los obtenidos de la trituración de hormigones.

Tabla 2.1. Requerimientos agregados reciclados según Código Alemán

Parámetro		Requerimiento	Método de evaluación
Contenido de grueso (AR+AN) (%)		≥ 95	
Componentes minerales (%)		≤ 5	
Componentes no minerales (%)		≤ 0.2	
Densidad seca (kg/dm ³)		$\geq 2.0 \pm 0.15$	
Absorción (%)	> 2 mm	≤ 10	
	≤ 2 mm	≤ 15	
pH		< 13.5	
Conductividad eléctrica ($\mu\text{s/cm}$)		8000	
Cloruros (mg/l)		150	
Sulfatos (mg/l)		600	
Arsénico ($\mu\text{g/l}$)		50	DIN 38 406-22 DIN EN ISO 11969
Plomo ($\mu\text{g/l}$)		100	DIN 38 406-6 DIN 38 406-16 DIN 38 406-22
Cadmio ($\mu\text{g/l}$)		5	DIN 38 406-16 DIN 38 406-22
Cromo total ($\mu\text{g/l}$)		100	DIN 38 406-22 DIN EN 1233
Cobre ($\mu\text{g/l}$)		200	DIN 38 406-7 DIN 38 406-16 DIN 38 406-22
Níquel ($\mu\text{g/l}$)		100	DIN 38 406-11 DIN 38 406-16 DIN 38 406-22
Mercurio ($\mu\text{g/l}$)		2	DIN EN 1483
Zinc ($\mu\text{g/l}$)		400	DIN 38 406-8 DIN 38 406-16 DIN 38 406-22

Tabla 2.2. Requerimientos agregados reciclados según Recomendación RILEM

Requisitos obligatorios	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Método de evaluación
Densidad seca mínima (kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO 6783 y 7033
Absorción de agua máxima (% m/m)	20	10	3	ISO 6783 y 7033
Máx. contenido de material con D _{sss} <2200 kg/m ³ (% m/m)	--	10	10	ASTM C 123
Máx. contenido de material con D _{sss} <1800 kg/m ³ (% m/m)	10	1	1	ASTM C 123
Máx. contenido de material con D _{sss} <1000 kg/m ³ (% m/m y % v/v)	1	0.5	0.5	ASTM C 123
Máx. contenido de partículas extrañas (% m/m)	5	1	1	Visual
Máx. contenido de metales (% m/m)	1	1	1	Visual
Máx. contenido de materia orgánica (% m/m)	1	0.5	0.5	NEN 5933
Máx. contenido de filler (<0.063mm) (% m/m)	3	2	2	prEN 933-1
Máx. contenido de arena (<4mm) (% m/m)	5	5	5	prEN 933-1
Máx. contenido de sulfatos (% m/m)	1	1	1	BS 812

Tabla 2.3. Requisitos agregados reciclados según Recomendación Española

Requisito	Límite	Método de evaluación
Contenido de grueso (AR+AN)	≥ 95 %	UNE-EN-933-1:98
Contenido de desclasificados	< 10 %	UNE-EN-933-1:98
Absorción	< 7 %	UNE-EN-1097-6:01
Material cerámico	< 5 %	prEN 933-11
Partículas ligeras	< 1 %	UNE 7244
Asfalto	< 1 %	prEN 933-11
Otros materiales	< 1 %	prEN 933-11
Cloruros	= AN	UNE 80-217:91
Sulfatos	= AN	UNE-EN 1744-1
Contenido partículas con bajo peso específico	= AN	UNE-EN 1744-1
Contenido partículas blandas	= AN	UNE 7134:58
Contenido terrones de arcilla	< 0.6%	UNE 7133:58
Desgaste Los Angeles	< 40 %	UNE-EN-1097-2:99
Durabilidad en sulfato de magnesio	= AN	UNE-EN-1367-2:99

= AN: igual que los exigidos para agregado natural

Observando los requerimientos indicados en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3, pueden hacerse las siguientes observaciones:

En primera instancia debe resaltarse que el Código Alemán y la Recomendación Española están orientados al empleo de agregados reciclados provenientes únicamente de la trituración de hormigones, mientras que la Recomendación RILEM establece tres categorías de agregados reciclados en función del tipo de material de desecho que contenga; el equivalente a los establecidos en los dos textos anteriores es el denominado como Tipo II (Tabla 2.2).

Otra distinción es que el Código Alemán es el único que permite el empleo de la fracción fina reciclada, previo cumplimiento de las mismas propiedades que las exigidas a las arenas naturales, en tanto que las otras dos se limitan a la fracción gruesa reciclada. Asimismo, los tres textos seleccionados limitan para los agregados

gruesos reciclados el contenido de partículas con tamaño menor a 4 mm a un máximo de 5 %.

En cuanto a la densidad de los agregados reciclados, la Recomendación Española es la única que no impone límites mientras que las dos restantes fijan un mínimo de 2.0 kg/dm³.

Otro de los parámetros importantes al momento de evaluar los agregados reciclados lo constituye la absorción de agua. En tal sentido el Código Alemán fija valores máximos de absorción del 10 % para las partículas de tamaño mayor a 2 mm y del 15 % para las de tamaño menor o igual a 2 mm. La Recomendación RILEM establece una absorción máxima del 10 % y la Recomendación Española lo fija en un 7 %. Debe recordarse que estas dos últimas se refieren únicamente a la fracción gruesa reciclada, mientras que la primera diferencia la fracción gruesa de la fina en el tamaño de 2 mm.

Respecto al contenido de componentes minerales los valores límites establecidos difieren de una a otra. En tal sentido, el Código Alemán lo fija en 5 % en tanto que la Recomendación RILEM los considera en función de la densidad del material limitándolo al 10 % para materiales con densidad saturada y superficie seca entre 1800 y 2200 kg/m³, al 1 % para materiales entre 1000 y 1800 kg/m³ y al 0.5 % cuando es menor a 1000 kg/m³, siempre considerando el agregado Tipo II. En el caso de la Recomendación Española limita el contenido de material desclasificado, según la denominación de dicha recomendación, a un 10 %.

En cuanto al contenido de materiales no minerales (madera, metales, plástico) el Código Alemán establece un límite del 0.2 %, la Recomendación RILEM fija un 1 % para metales y también un 1 % para el resto de este tipo de materiales en conjunto, mientras que la Recomendación Española indica cantidades máximas del 5 % para cerámicos, 1 % para asfalto y 1 % para el resto de los materiales.

De lo indicado en los dos párrafos anteriores respecto al contenido de materiales distintos de los agregados reciclados de hormigón surge que el Código Alemán es el más conservador de los tres, en tanto que la Recomendación Española parece ser la que menos restricciones impone a las cantidades de materiales extraños.

La Recomendación RILEM, además, hace referencia a los contenidos máximos de materia orgánica y filler, los cuales fija en el 0.5 y 2 % respectivamente. Asimismo, establece otros requisitos adicionales para el agregado reciclado cuyos límites son los mismos que los considerados para los agregados naturales.

La Recomendación Española por su parte indica para los agregados reciclados iguales contenidos de partículas blandas y de bajo peso específico que los exigidos para los agregados naturales. Con relación a la durabilidad en sulfato de magnesio fija el valor de pérdida igual al exigido en el agregado natural (12 %).

Respecto al contenido de contaminantes la recomendación RILEM y la de España establecen limitaciones únicamente a los contenidos de cloruros y sulfatos en los agregados reciclados. En el caso de la primera, fija el contenido máximo de sulfatos en 1 % y el contenido de cloruros igual al del agregado natural. En el caso de la segunda, ambos parámetros se toman igual al de los agregados naturales.

El Código Alemán resulta en este sentido el más completo al momento de evaluar los agregados reciclados desde el punto de vista de los contaminantes, ya que además de limitar los contenidos de cloruros y sulfatos también lo hace con otros elementos como arsénico, cromo, mercurio (Tabla 2.1).

En el ensayo de desgaste "Los Angeles" la Recomendación Española establece una pérdida máxima del 40 % mientras que la Recomendación RILEM fija igual límite que para los agregados naturales. El Código Alemán por su parte no hace referencia especial sobre este ensayo aunque deja en claro que los requisitos que no son especificados en el mismo deben ser considerados con los mismos límites establecidos para los agregados naturales de densidad normal.

2.2.3. REQUERIMIENTOS PARA LOS HORMIGONES RECICLADOS

En lo que respecta a los requisitos que son exigidos a los hormigones elaborados con agregados reciclados debe mencionarse que las recomendaciones seleccionadas fijan el porcentaje de agregado reciclado a emplear como así también el nivel resistente del hormigón y el destino del mismo.

El Código Alemán no impone restricciones al hormigón reciclado cuando el mismo va a ser utilizado en elementos de interior, mientras que en otros casos sólo

requiere que el mismo no sea sensible a la reacción álcali-sílice, permitiendo el empleo de hormigones reciclados en elementos expuestos a diferentes ambientes (Tabla 2.4). Se observa que no se permite la utilización de material potencialmente reactivo para usos externos, aún cuando se empleen cementos de características especiales. Sin embargo, la recomendación permite para hormigón armado, la adición de hasta un 5 % en masa del agregado reciclado.

Tabla 2.4. Aplicación y restricciones hormigones reciclados según Código Alemán

Campo de Aplicación	Restricciones
Componentes en interior	Ninguna
Componentes en exterior en general	El material debe ser clasificado como insensible a la reacción álcali-sílice
Componentes impermeables al agua	
Componentes con moderada resistencia al ataque químico	

El contenido máximo de agregado reciclado que puede ser utilizado en la elaboración de hormigones, depende de la fracción involucrada y del tipo de exposición que tendrá dicho hormigón. Tales porcentajes se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Máxima cantidad de agregado reciclado según Código Alemán referido a) a la cantidad total de agregado; b) a la fracción granular

		Roca y arena triturada > 2 mm (Vol. %)		Arena triturada ≤ 2 mm (Vol. %)	
		a)	b)	a)	b)
Componentes en interior	≤ B 25 ¹	35	50	7	20
	B 35 ¹	25	40	7	20
Componentes en exterior en general		20	30	0	
Componentes impermeables al agua					
Componentes con alta resistencia al congelamiento					
Componentes con moderada resistencia al ataque químico					

¹ De acuerdo con DIN1045.

Según el Código Alemán en los hormigones reciclados se deben tener en cuenta las mismas determinaciones que en los hormigones convencionales. Sin embargo la capacidad de absorción de los agregados reciclados no puede ser subestimada. En tal sentido, indica que es necesario conocer la cantidad de humedad presente en los agregados reciclados como así también la capacidad de absorción de agua de los mismos, adoptando la determinada a 10 minutos ya que representa hasta el 90 % de la absorción a 24 horas. El conocimiento de ambos parámetros permitirá la definición de la relación agua/cemento efectiva.

Debido a la absorción de agua y al contenido de humedad natural del agregado reciclado, puede ocurrir un cambio importante en la consistencia del hormigón entre el tiempo de mezclado y el de llenado. La corrección del mismo por medio de la adición de agua en el lugar no es permitido. Por tal motivo la recomendación hace hincapié en la dosis de aditivo superplastificante necesaria para compensar la pérdida de asentamiento. Luego de la adición del superplastificante, la trabajabilidad del hormigón elaborado con agregados reciclados no difiere de la del hormigón elaborado con agregado natural.

La Recomendación RILEM, por su parte, limita el nivel resistente del hormigón en función del tipo de agregado reciclado utilizado. Para el caso en donde el agregado reciclado se emplea mezclado con agregados naturales (Tipo III) dicha recomendación no impone límites a la clase resistente del hormigón, pudiéndolo emplear en hormigón simple o armado. Asimismo indica los ensayos adicionales que deben realizarse al hormigón en función de la clase de exposición del ambiente, dadas según la norma ENV 206:

- Exposición clase 1. Ambiente seco: Interiores de edificios para viviendas y oficinas.
- Exposición clase 2. Ambiente húmedo:
 - a) sin heladas: interior de edificios con elevada humedad, elementos exteriores, elementos interiores en suelos no agresivos y/o agua.
 - b) con heladas: elementos exteriores expuestos al hielo, elementos en suelos no agresivos y/o agua expuestos al hielo, elementos interiores con elevada humedad y expuestos al hielo.
- Exposición clase 3. Ambiente húmedo con hielo y sales descongelantes: elementos exteriores e interiores expuestos al hielo y agentes de deshielo.

- Exposición clase 4. Ambiente marino:
 - a. sin hielo: elementos parcial o totalmente sumergidos en agua salada o en la zona de salpicaduras y expuestos al hielo, elementos en aire saturado de sal.
 - b. con hielo: elementos parcialmente sumergidos en agua salada o en la zona de salpicadura, elementos en aire saturado de sal y expuestos al hielo.

En la tabla 2.6 se observa que estos requisitos adicionales son de importancia para las exposiciones tipo 2, 3 y 4, donde los hormigones reciclados pueden presentar un comportamiento diferente al del hormigón convencional. En tal caso los criterios de evaluación a adoptar están indicados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.6. Restricción al empleo de hormigones según Recomendación RILEM

Requisitos	Agregado reciclado		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Máxima clase resistente	H 16/20 ^a	H 50/60	Ningún límite
Ensayo adicional Exposición clase 1	No se requiere	No se requiere	No se requiere
Ensayo adicional Exposición clase 2a y 4a	Expansión álcali sílice (clase 2a) No permitido su uso en clase 4 ^a	Expansión álcali sílice	Expansión álcali sílice
Ensayo adicional Exposición clase 2b y 4b	No permitido su uso en clase 2b, 4b	Expansión álcali sílice Congelación y deshielo	Expansión álcali sílice Congelación y deshielo
Ensayo adicional Exposición clase 3	No permitido su uso en clase 3	Expansión álcali sílice Congelación y deshielo Sales descongelantes	Expansión álcali sílice Congelación y deshielo Sales descongelantes

^a Esta puede aumentar a H 30/37 siempre que la Dsss exceda los 2000 kg/m³

Tabla 2.7. Criterios de durabilidad hormigones reciclados según
Recomendación RILEM

Ensayo adicional	Norma	Criterio
Expansión álcali sílice	De acuerdo a las regulaciones nacionales	De acuerdo a las regulaciones nacionales
Congelación y deshielo	ASTM C666	Factor de durabilidad > 80 %
Sales descongelantes	SS 137244	Máxima pérdida de peso < 500 g/m ²

En cuanto a lo estipulado en la Recomendación Española debe mencionarse que la misma restringe el empleo de hormigones reciclados a elementos en masa y armados hasta 40 MPa de resistencia, quedando excluidos los elementos pretensados. Al igual que el Código Alemán y la Recomendación RILEM, limita el contenido de agregado grueso reciclado a utilizar, permitiendo hasta un 20 %, el cual debe provenir de la trituración de hormigones de desecho. En caso de querer utilizar un porcentaje mayor de agregado reciclado se deberán realizar los ensayos pertinentes. Introduce el tema de los recubrimientos a considerar en el proyecto estructural, estableciendo que pueden considerarse los mismos que en los hormigones convencionales cuando el porcentaje de reemplazo se encuentre debajo del 20 %.

Asimismo especifica que la mayor porosidad de los agregados reciclados hace que los hormigones con ellos elaborados sean más susceptibles a los efectos del ambiente, por lo cual se deberán tomar medidas especiales cuando se mantengan las mismas dosificaciones que en los hormigones convencionales o cuando los porcentajes de agregado reciclado sean mayores.

Con relación a la exposición de los hormigones reciclados en clima frío esta recomendación indica que el agregado reciclado deberá cumplir con la especificación relativa a la estabilidad en solución de sulfatos de sodio, y que para reemplazos superiores al 20 % se deberán realizar ensayos específicos.

Para exposiciones en ambientes donde el hormigón se encuentre expuesto al ataque por sulfatos o agua de mar, el empleo de agregados reciclados queda limitado al conocimiento de la procedencia del hormigón y que el mismo haya sido elaborado con cementos resistentes a los sulfatos o al agua de mar respectivamente.

Cuando el hormigón va a estar expuesto a condiciones de erosión la recomendación exige que los agregados reciclados a utilizar en la elaboración del mismo cumplan con el requisito de desgaste máximo en el ensayo “Los Ángeles” del 30 %.

En el caso de exposición en ambientes húmedos, se recomienda la utilización de agregados provenientes de una única fuente controlada y realizar los ensayos de reactividad álcali-agregado correspondientes sobre el conjunto granular a emplear en la elaboración de dicho hormigón. En el caso de emplear agregados de distintas fuentes o procedencias, se deberán adoptar las medidas indicadas en la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE) para agregados potencialmente reactivos.

Otro de los problemas de durabilidad que afecta a los hormigones, y en especial al reciclado, es el de la corrosión de las armaduras. En tal sentido, esta Recomendación indica que para porcentajes de uso de los agregados reciclados inferiores al 20 % el comportamiento de los hormigones reciclados es similar al de los hormigones convencionales. Para porcentajes mayores la protección frente a la corrosión es inferior y se deberán realizar los ensayos correspondientes en cada caso.

Con respecto al cálculo de las estructuras y elementos de hormigón el Código Alemán establece que los distintos componentes del edificio pueden ser diseñados con los mismos valores características que los componentes de hormigón convencional, manteniendo los porcentajes de reemplazo anteriormente mencionados. En aquellas construcciones en las cuales las deformaciones tienen que ser consideradas, las propiedades del hormigón endurecido con agregados reciclados tienen que ser evaluadas mediante los ensayos correspondientes.

De igual modo, la Recomendación RILEM indica que para el hormigón con agregados reciclados se emplean los mismos principios de diseño y reglas de aplicación indicados en el prENV 1992-1-1 para el hormigón convencional; sin embargo se debe tener en cuenta la influencia de la densidad de dichos agregados en la resistencia y deformación del hormigón.

Asimismo deja en claro que en ausencia de datos experimentales más precisos se pueden estimar las características del hormigón multiplicando los valores expuestos en el prENV 1992-1-1 para el hormigón convencional por los coeficientes dados en la Tabla 2.8. Cuando sean necesarios datos más precisos (por ejemplo cuando las

deformaciones resultan de gran importancia) es necesario realizar los ensayos correspondientes.

Tabla 2.8. Coeficientes de corrección para estimar las propiedades de los hormigones según Recomendación RILEM

Valores de diseño	Agregado Reciclado		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Resistencia a tracción	1	1	1
Módulo de elasticidad	0.65	0.8	1
Coefficiente de Creep	1	1	1
Contracción por secado	2	1.5	1

Para el diseño de una estructura puede ser importante conocer más parámetros que los que se dan en la Tabla 2.8 por lo que se recomienda en tales casos el uso de los procedimientos para agregados livianos según lo indicado en el Eurocódigo 2.

La Recomendación Española indica que para hormigones elaborados con hasta un 20 % de agregado grueso reciclado se pueden seguir los procedimientos de cálculo correspondientes a los hormigones convencionales, tanto en lo que hace al diagrama tensión-deformación como en lo referente al módulo estático de elasticidad, la contracción por secado y la fluencia.

En el caso de utilizar porcentajes superiores al indicado se recomienda la realización de estudios específicos. Respecto al módulo de elasticidad, indica de manera orientativa que para un 100 % de reemplazo el valor corresponde al 80 % del de un hormigón convencional, aconsejando la realización de estudios en cada caso. De igual modo, para la contracción y la fluencia del hormigón con 100 % de agregado grueso reciclado indica que las mismas serán 1.50 y 1.25 veces las correspondientes a un hormigón convencional respectivamente.

2.2.4. CONCLUSIONES

- Las tres recomendaciones hacen referencia al empleo de la fracción gruesa reciclada, atribuyendo a la fracción fina reciclada la causante de los mayores

inconvenientes en la producción de hormigones como así también en los cambios en sus propiedades. El Código Alemán es el único que permite el empleo de la fracción fina siempre que cumpla con los mismos requisitos que las arenas naturales.

- La Recomendación RILEM es la única que permite el empleo de agregados gruesos reciclados provenientes de la trituración de desechos de mampostería para la elaboración de hormigones, con una absorción máxima del 20 %.
- Para la mayoría de las propiedades, los agregados gruesos reciclados provenientes de la demolición de estructuras de hormigón deben cumplir con los mismos límites impuestos para los agregados naturales de densidad normal. Con respecto a la absorción de agua, dichos límites se encuentran establecidos en valores máximos entre 7 y 10 %. Para la fracción fina reciclada, el Código Alemán establece una absorción máxima del 15 %.
- En cuanto a los requisitos de tipo químico que deben cumplir los agregados reciclados, el Código Alemán establece contenidos máximos permisibles para un gran número de elementos químicos, mientras que RILEM sólo lo hace para cloruros y sulfatos y la recomendación Española para los sulfatos.
- El porcentaje máximo de agregado reciclado a utilizar en la elaboración de hormigones para el cual las propiedades de los hormigones reciclados no se verán afectadas con relación a las de los hormigones convencionales se encuentra establecido, según las Recomendaciones RILEM y Española, en un 20 %. La Recomendación RILEM permite porcentajes más altos en hormigones de menor nivel resistente. La Recomendación Española por su parte admite porcentajes mayores de reemplazo previa verificación de las propiedades de los hormigones con ellos elaborados.
- El Código Alemán va más allá de las dos recomendaciones anteriores diferenciando el porcentaje de utilización en función del tipo de exposición del elemento estructural. Para la fracción gruesa permite contenidos máximos de hasta el 50 % en elementos de interior y del 30 % en elementos de exterior. Para la fracción fina limita el contenido al 20 % en elementos de interior y no lo permite en el caso de elementos exteriores.

- Todas las recomendaciones coinciden en que, para los porcentajes de reemplazo estipulados, los cálculos estructurales generales pueden realizarse con iguales consideraciones que para los hormigones convencionales. Si se requieren datos más precisos se deberán realizar los ensayos pertinentes.
- La Recomendación RILEM y el Código Alemán no establecen un límite de resistencia para los hormigones con agregados reciclados siempre que no se excedan los porcentajes sugeridos, mientras que la Recomendación Española limita el uso de agregados reciclados a hormigones tipo H-40.

Capítulo 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

En el presente capítulo se describe brevemente el programa experimental desarrollado el cual tuvo como propósito fundamental valorar la influencia de la incorporación de agregados provenientes de la trituración de hormigones de desecho (agregados reciclados) sobre el comportamiento mecánico del hormigón, principalmente en lo relacionado a su mecanismo de rotura. Dicho plan incluye la selección y caracterización de distintos tipos de agregados (naturales y reciclados) los cuales se utilizaron para la elaboración de hormigones con matrices de tres niveles de resistencia. Las propiedades de dichos agregados se presentan en el capítulo 4 y un estudio de la adherencia matriz-agregado se describe en el capítulo 5. Asimismo se describen las experiencias realizadas sobre dichos hormigones, cuyos resultados serán desarrollados y analizados en el capítulo 6.

Posteriormente se describen las metodologías de ensayo empleadas para la caracterización de los agregados como los métodos de evaluación aplicados y el instrumental y dispositivos empleados para el estudio del comportamiento mecánico y del proceso de fractura en estos hormigones.

3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental del plan de tesis se seleccionaron y caracterizaron dos fracciones de agregados gruesos reciclados (*Ra* y *Rb*). Estos agregados se obtuvieron de la trituración de dos hormigones de razón agua/cemento 0.30 y 0.50 los cuales fueron elaborados con piedra partida granítica. El material resultante fue seleccionado tomándose para la determinación de sus propiedades la fracción gruesa. Se evaluaron, además de la resistencia, su granulometría, índice de lajosidad y elongación, absorción de agua a 24 horas y densidad saturada y superficie

seca. Los resultados obtenidos fueron comparados con una piedra partida granítica, analizándose varias fracciones (g 6-12 mm, g 6-20 mm y g 10-30 mm) para reproducir mediante una combinación de dichas fracciones las curvas granulométricas de los agregados reciclados Ra y Rb .

Se evaluó la adherencia de las interfaces en hormigón reciclado, analizando un mortero de resistencia normal y un mortero de alta resistencia frente a distintos agregados, comparando a la vez varias texturas superficiales.

Secundariamente se evaluaron las propiedades de un agregado reciclado proveniente de la trituración de losas de pavimento de hormigón de una obra vial (Rv) y una piedra partida cuarcítica (q). Esto tuvo como objetivo comparar los agregados utilizados con un agregado natural que presenta propiedades con marcadas diferencias respecto a la piedra partida granítica como así también con un agregado reciclado de origen desconocido. Cabe destacar que el hormigón de las losas de pavimento había sido elaborado con una piedra partida cuarcítica.

Luego de las experiencias comentadas, con los agregados seleccionados (Ra y Rb) se elaboraron tres series de hormigones caracterizados por niveles de resistencia a compresión de aproximadamente 18, 37 y 48 MPa (Series 1, 2 y 3 respectivamente), con el propósito de analizar distintos niveles de resistencia de la matriz (mortero). En cada serie se incluyeron un hormigón elaborado con una combinación de las distintas fracciones de piedra partida granítica, identificado como G, y dos hormigones con 100 % de los agregados reciclados Ra y Rb , los cuales se identifican como A y B respectivamente.

Se moldearon cilindros y prismas que fueron curados en cámara húmeda (95 % humedad relativa, 20 °C) hasta la edad de ensayo (28 días). Se moldeó un mínimo de 4 cilindros y 4 prismas en cada caso. Se evaluaron la resistencia a compresión del hormigón (f'_c) y el módulo de elasticidad estático (E) y se realizaron ensayos de flexión con carga central sobre vigas entalladas. A partir de las curvas carga-flecha se determinaron como resultados la resistencia a tracción (f_{net}) y la energía de fractura (G_F). Asimismo se registraron las curvas carga-apertura de fisura (CMOD).

Sobre las mitades resultantes del ensayo de flexión se realizaron ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}). A la vez sobre otros fragmentos se determinaron la absorción y densidad de cada hormigón. Finalmente se analizaron

las superficies de fractura observando la distribución y estado de los agregados y de las interfaces.

3.2. METODOLOGÍA DE ENSAYO

A continuación se presentan los detalles relacionados con la metodología de ensayo, tanto para la caracterización de los agregados como para el estudio del comportamiento mecánico y del proceso de fractura en los hormigones.

3.2.1. Caracterización de los agregados

Los agregados naturales y reciclados fueron caracterizados aplicando técnicas tradicionales. El material resultante de la trituración fue seleccionado tomándose la fracción retenida en el tamiz N° 4 (fracción gruesa) con un tamaño máximo de partícula de 26.5 mm (tamiz 1"). De cada una de las muestras de material reciclado se separó por cuarteo la cantidad necesaria para la determinación de sus propiedades físicas (Norma IRAM N° 1509).

Se realizó el análisis granulométrico aplicando la Norma IRAM 1505. Las muestras fueron secadas en estufa hasta peso constante a una temperatura de 100 °C. Posteriormente fueron tamizadas en forma manual, a través de la serie de tamices IRAM normalizada y las fracciones retenidas por cada tamiz fueron pesadas con una precisión de 0.1 g, determinando el porcentaje de material retenido por cada tamiz y los porcentajes retenidos acumulados. Asimismo se calculó el módulo de finura.

Para la determinación de la absorción de agua y densidad de los agregados se utilizó la Norma IRAM 1533. Las muestras fueron lavadas y posteriormente colocadas bajo agua durante un período de 24 horas. Se determinó el peso sumergido y el peso saturado y superficie seca, ambos con una precisión de 0.1 g. Posteriormente las muestras fueron secadas en estufa a 100 °C hasta alcanzar peso constante, determinándose su peso seco. Con estos valores se determinó la absorción de agua a 24 horas y la densidad saturada y superficie seca.

El índice de lajosidad "iL" y el de elongación "iE" se determinaron mediante la aplicación de la Norma IRAM 1687, Parte 1 y Parte 2. Se separó por cuarteo una muestra representativa de cada agregado grueso a analizar, desechando el material

retenido en el tamiz IRAM 63.0 mm y el que pasó el tamiz IRAM 6.3 mm. Se secó la muestra en estufa a 100 °C y posteriormente se tamizó por los tamices correspondientes, determinando el peso retenido y el porcentaje retenido por cada fracción. Se determinó el índice de lajosidad de cada fracción, pasando cada partícula por la ranura del calibrador correspondiente a la fracción analizada, y el índice de elongación, pasando cada una de las fracciones por la separación entre las dos barras del calibrador de longitudes correspondientes a la fracción. Finalmente se calcularon el índice de lajosidad y el índice de elongación de la muestra como la media ponderada de los índices de todas las fracciones, usándose como factor de ponderación el porcentaje retenido por cada fracción.

Continuando con la evaluación de los agregados se realizó un ensayo de carga puntual mediante el cual se estimó la resistencia a compresión de cada tipo de agregado. Dicho ensayo fue realizado según un método sugerido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (International Society for Rock Mechanics, 1985).

Se seleccionaron entre 20 y 30 muestras de agregados por cada tipo de piedra a evaluar. Se aplicó una carga concentrada sobre cada muestra, mediante un par de puntas cónicas de 5 mm de diámetro, en la dirección de su menor dimensión, hasta producir la rotura de la misma. La Figura 3.1 muestra las características de dichas puntas y la Figura 3.2 los requisitos para las muestras utilizadas.

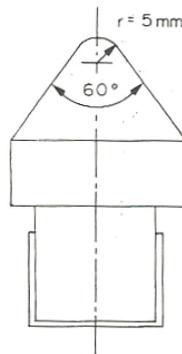


Figura 3.1. Forma y tamaño de las puntas utilizadas en el ensayo de carga puntual

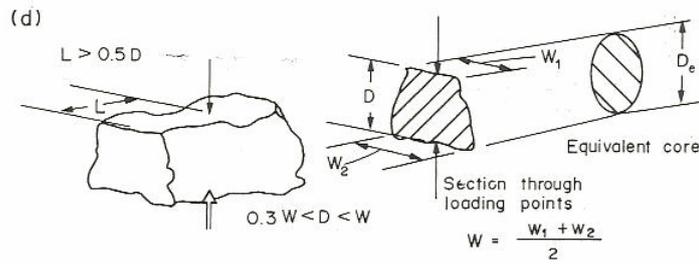


Figura 3.2. Características de las muestras utilizadas en el ensayo de carga puntual

Se registró la carga de rotura (P) y posteriormente se calculó el área de la sección de rotura A (cm^2) como $A=W \times D$ donde D (cm) es la altura y W (cm) el ancho promedio de la muestra en dicha sección. Con estos datos se determinó el índice de carga puntual I_s (kg/cm^2) mediante la fórmula:

$$I_s = P \times D e^2$$

Donde P (kg) es la carga de rotura y De (cm) es el diámetro equivalente de la sección de rotura el cual se calcula como $De = (4 / \pi) \times A$

Los valores experimentales obtenidos para el índice de carga puntual I_s , se corrigieron por tamaño para obtener el índice estándar $I_s(50)$ (kg/cm^2) mediante la siguiente expresión:

$$I_s(50) = F \times I_s$$

Donde F es un factor de corrección adimensional calculado como $F = [De(\text{mm}) / 50(\text{mm})]^{0.45}$

Posteriormente se calculó la resistencia a compresión q_u (kg/cm^2), a partir del índice de carga puntual corregido por tamaño, mediante la siguiente fórmula:

$$q_u = 22 \times I_s(50)$$

Para la determinación de la adherencia matriz-agregado se emplearon prismas compuestos de 25 mm de lado, constituidos por matriz (mortero) y roca (agregado natural o reciclado) con diferentes texturas superficiales, que fueron ensayados a flexión con carga central, con una luz entre apoyos de 63 mm. Los ensayos se realizaron en una máquina de deformación controlada empleando una velocidad de desplazamiento de 0.2 mm/minuto.

Los agregados fueron obtenidos a partir del aserrado de piezas de hormigón y de trozos de roca (granito). La textura superficial requerida en cada caso fue lograda mediante la aplicación de diferentes técnicas: cortado, arenado y fracturado.

Las probetas fueron curadas en agua saturada con cal hasta la edad de ensayo adoptada (14 días). En la Figura 3.3 se muestra un esquema de las probetas y forma de carga utilizados.

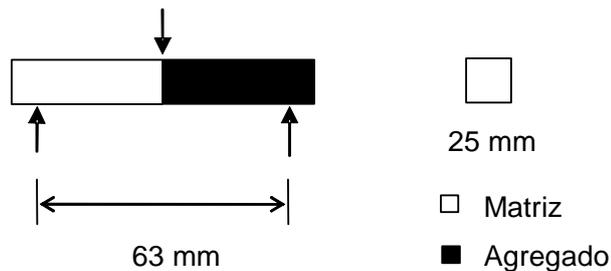


Figura 3.3. Ensayo de adherencia matriz-agregado

En forma simultánea a los ensayos de adherencia se midió la resistencia a flexión de la fase mortero (matriz) y de la fase agregado empleando prismas de iguales dimensiones y bajo las mismas condiciones de ensayo.

3.2.2. Estudios sobre hormigón

Los métodos de evaluación del comportamiento mecánico y del proceso de fractura en estos hormigones no difieren de los habitualmente aplicados.

Siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 1546 y la Norma ASTM C-469 se realizaron ensayos de compresión sobre cilindros de 150 x 300 mm y de 100 x 200 mm, determinándose la resistencia a compresión del hormigón (f'_c). Se

midieron las deformaciones transversales y longitudinales disponiendo transductores (LVDT y extensómetro tipo Clip) fijos en los dispositivos habitualmente empleados para la determinación del módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ). Se aplicaron tres ciclos de carga hasta el 40 % de la tensión de rotura con el objeto de determinar el módulo de elasticidad considerando las deformaciones al 5 y al 40 % de la resistencia. Asimismo se calculó la relación de Poisson, que corresponde al 40 % de la carga máxima durante el tercer ciclo de carga. En la Figura 3.4 se muestran las probetas y forma de carga utilizados.

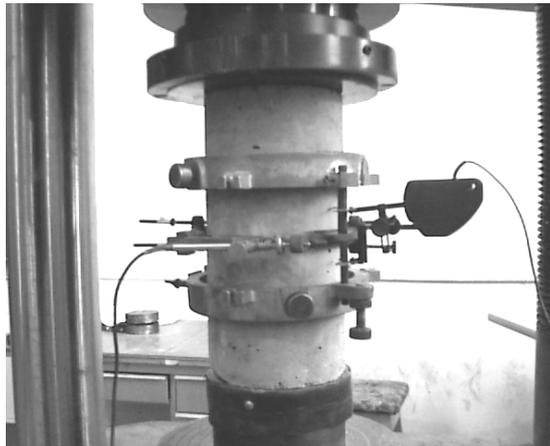


Figura 3.4. Ensayo de compresión

Los ensayos de flexión con carga central se realizaron sobre prismas de 75 x 105 x 430 mm, entallados hasta la mitad de la altura, empleando una luz entre apoyos de 400 mm. La entalladura fue realizada mediante sierra diamantada un día antes de la fecha de ensayo. Se empleó un sistema de control por lazo cerrado utilizando la medida de la flecha, obtenida con un LVDT, como señal de control y con una velocidad de 0.20 mm/minuto. Al mismo tiempo se midió la apertura de fisura en la entalladura (CMOD) mediante un extensómetro tipo clip. En la Figura 3.5 se muestran las probetas y dispositivos de carga utilizados.

A partir de las curvas carga-flecha se determinaron como resultados la resistencia a tracción (f_{net}) y la energía de fractura (G_F) siguiendo los lineamientos del comité RILEM TC-50-FMC. Asimismo se registraron las curvas carga-apertura de fisura (CMOD).



Figura 3.5. Ensayo de flexión

Según el Comité RILEM la energía de fractura G_F se calcula como

$$G_F = (W_0 + m_g \times \delta_0) / A_{lig}$$

Donde W_0 es el trabajo de fractura (igual al área bajo la curva carga-flecha), m_g la contribución del peso de la viga, δ_0 el desplazamiento final de la viga, y A_{lig} el área de ligadura antes del ensayo.

La resistencia a tracción f_{net} se calcula como

$$f_{net} = 6 \times (F_{max} + (m_g / 2)) \times l / 4 \times b \times h^2$$

Donde b es el ancho de la viga, h la altura neta, l la luz de ensayo y F_{max} la carga máxima.

Otro elemento de interés para el análisis del proceso de falla en tracción es la longitud característica (l_{ch}), que se calcula como

$$l_{ch} = E \times G_F / f_t^2$$

donde E es el módulo de elasticidad obtenido en compresión y f_t la resistencia a tracción.

Sobre algunas de las mitades resultantes del ensayo de flexión se realizaron ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}). Según la Norma IRAM 1658 este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. En este caso se utilizaron las mitades de las vigas considerando el círculo inscrito en ellas, por lo cual la altura de la viga equivale al diámetro del cilindro y el ancho de la viga a la altura del cilindro. Se trazaron dos líneas contenidas en un plano que sirvieron como guía para la colocación de los listones de madera.

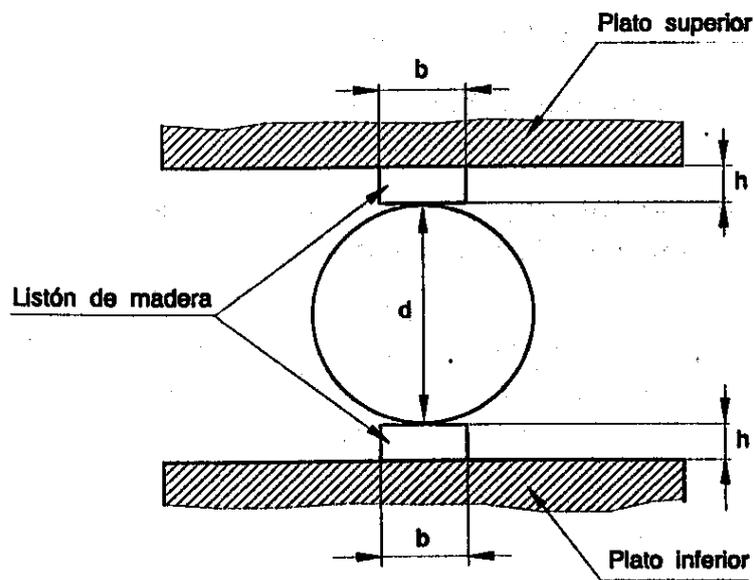


Figura 3.6. Ensayo de tracción indirecta según norma IRAM 1658

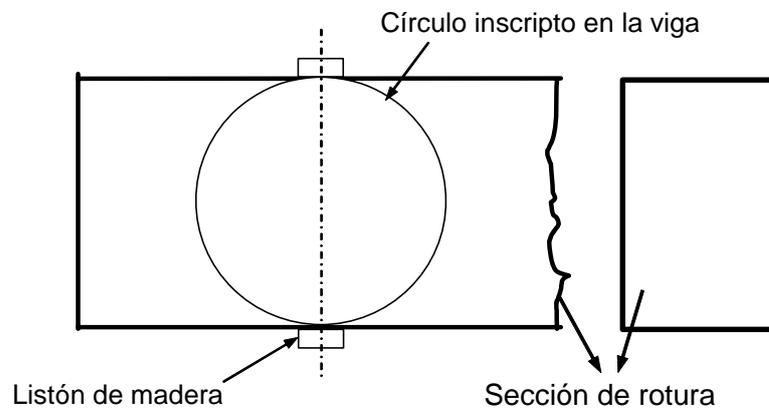


Figura 3.7. Ensayo de tracción indirecta realizado

A la vez sobre otros fragmentos obtenidos a partir de las mitades de las vigas se determinaron la absorción y densidad de cada hormigón. Para la determinación de la absorción de agua y densidad de los hormigones se utilizó la Norma ASTM C-642. Las muestras fueron colocadas bajo agua durante 24 horas. Se determinaron el peso sumergido y el peso saturado a superficie seca, ambos con una precisión de 0.1 g. Posteriormente las muestras fueron secadas en estufa a 100 °C hasta alcanzar peso constante, determinándose su peso seco. Con estos valores se determinó la absorción de agua a 24 horas y la densidad saturada y superficie seca.

Finalmente se analizaron las superficies de fractura observando la distribución y estado de los agregados y de las interfaces. El perímetro de los agregados se calcó directamente en un papel transparente sin ninguna preparación previa de la muestra. Cabe destacar que se realizó el conteo de agregados gruesos en cada sección, distinguiendo los agregados despegados (falla de interfaces) y los agregados fracturados (desarrollo de fisuras a través de los agregados). El registro sobre dicho papel fue escaneado para obtener la imagen en formato digital y poder analizarla a través de un procesador de imágenes.

Se utilizaron dos software de procesamiento de imágenes. Mediante un primer software se acondicionaron las imágenes para ser evaluadas con el segundo procesador. Mediante el segundo software se obtuvieron el área, perímetro y cantidad de agregados. Asimismo a partir de estos datos se calcularon como parámetros para el análisis el área de agregados en referencia a la sección analizada (densidad superficial de los agregados, expresada en %) y los porcentajes de agregados despegados y fracturados.

Capítulo 4

CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Con el propósito de estudiar el proceso de fractura en hormigón reciclado, se obtuvieron y caracterizaron dos fracciones de agregados gruesos reciclados (*Ra* y *Rb*). Como se describió en el Capítulo 3 estos agregados se obtuvieron de la trituración de dos hormigones elaborados con piedra partida (razón agua/cemento 0.30 y 0.50). El material resultante de la trituración fue seleccionado tomándose la fracción gruesa con un tamaño máximo de partícula de 26.5 mm.

Se analizaron su granulometría, absorción, densidad, índice de lajosidad “iL”, índice de elongación “iE”. También se evaluaron la adherencia matriz-agregado y la resistencia de dichos agregados. Los resultados obtenidos para los agregados reciclados fueron comparados con piedra partida granítica, utilizándose tres fracciones identificadas como *g* 6-12, *g* 6-20 y *g* 10-30, donde los números indican el tamaño de la fracción en mm.

Asimismo se evaluó un agregado reciclado proveniente de la trituración de losas de pavimento de hormigón de una obra vial (*Rv*), el cual había sido elaborado con piedra partida cuarcítica, como así también una piedra partida cuarcítica (*q* 6-20). Esto tuvo como objetivo comparar los agregados utilizados con un agregado natural con propiedades diferentes respecto a la piedra partida granítica, como así también con un agregado reciclado de origen desconocido elaborado con otro tipo de agregado natural.

4.1. GRANULOMETRÍA

Se realizó el análisis granulométrico de todos los agregados aplicando la Norma IRAM 1505. En la Tabla 4.1 se resumen los valores obtenidos para cada agregado y en la Figura 4.1 se muestran las curvas granulométricas.

Tabla 4.1. Granulometría de los agregados gruesos

Abertura tamiz (mm)	% retenido acumulado						
	Ra	Rb	g 6-12	g 6-20	g 10-30	q 6-20	Rv
37,50	0	0	0	0	0	0	0
26,50	0	0	0	0	5	0	14
19,00	11	8	0	3	55	0	35
13,20	55	44	0	56	96	40	63
9,50	74	68	6	82	99	65	75
4,75	99	98	98	98	100	95	99
2,36	100	100	100	99	100	97	100
1,18	100	100	100	99	100	97	100
0,60	100	100	100	99	100	98	100
0,30	100	100	100	99	100	99	100
0,15	100	100	100	100	100	99	100
0,074	100	100	100	100	100	100	100
Módulo de finura	6.84	6.74	6.04	6.78	7.54	6.50	7.09

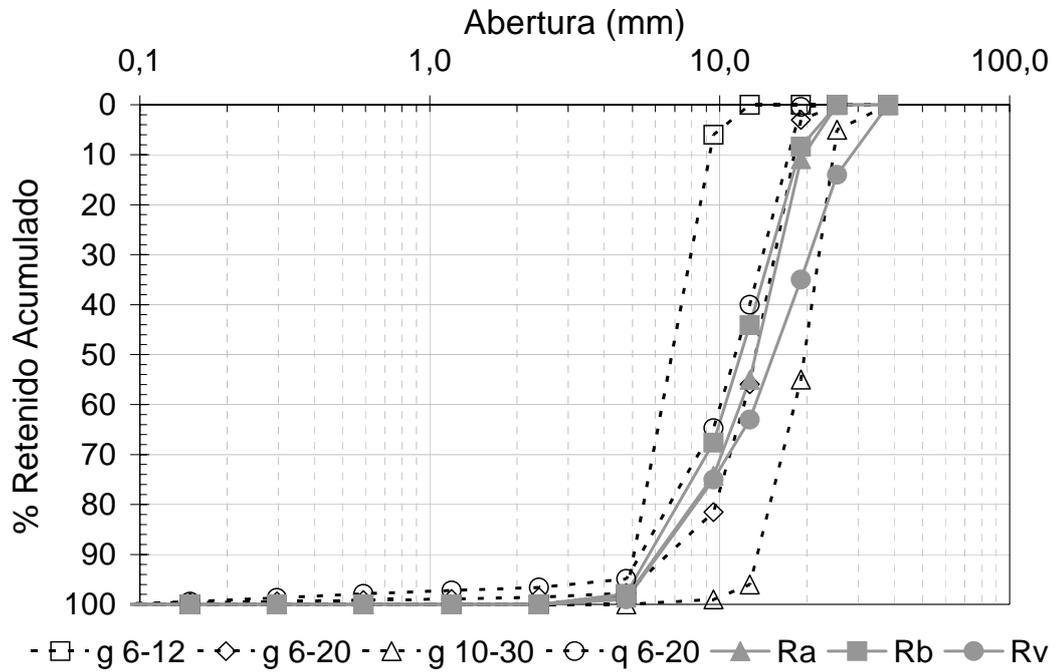


Figura 4.1. Curvas granulométricas de los agregados gruesos

4.2. ABSORCIÓN Y DENSIDAD

Se determinó la absorción de agua y densidad de todos los agregados utilizando la Norma IRAM 1533. En la Tabla 4.2 se resumen los valores obtenidos para todos los agregados.

Tabla 4.2. Absorción y Densidad de los agregados gruesos

Agregado	Absorción (%)	Densidad
<i>Ra</i>	4.8	2.53
<i>Rb</i>	5.0	2.38
<i>g 6-12</i>	0.4	2.75
<i>g 6-20</i>	0.4	2.65
<i>g 10-30</i>	0.3	2.70
<i>q 6-20</i>	1.8	2.47
<i>Rv</i>	6.6	2.35

Puede observarse que los agregados reciclados *Ra* y *Rb*, obtenidos a partir de la trituración de los hormigones de diferentes calidades, tuvieron valores de absorción significativamente superiores a los agregados naturales, tanto para el granito (*g*) como para la cuarcita (*q*). Lo mismo ocurrió con el reciclado proveniente de la obra vial (*Rv*). Con respecto a la densidad de los agregados se observa que los valores obtenidos fueron inferiores a la densidad del agregado natural.

Asimismo se observa que los agregados reciclados *Ra* y *Rb* obtenidos de la trituración de hormigones de distinta calidad ($a/c=0.30$ y $a/c=0.50$) tienen una capacidad de absorción similar, lo que verifica que la absorción de los agregados reciclados no resulta mayormente afectada por la razón agua cemento del hormigón original.

4.3. ÍNDICE DE LAJOSIDAD Y ELONGACIÓN

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados del índice de lajosidad “iL” y de elongación “iE” determinados mediante la aplicación de la Norma IRAM 1687, Parte 1 y Parte 2. Este ensayo fue realizado sólo para los agregados reciclados *Ra* y *Rb*, y para las fracciones *g 6-20* y *g 10-30* de piedra partida granítica, ya que fueron los

agregados utilizados en la elaboración de los hormigones y su forma incide sobre el mecanismo de fractura del hormigón.

Como puede observarse el agregado reciclado presenta porcentajes inferiores de partículas lajosas como así también de partículas elongadas, lo que se traduce en una mayor cubicidad de los agregados reciclados frente a los naturales. Esto se debe fundamentalmente a la presencia de mortero adherido a las partículas del agregado original.

Tabla 4.3. Índice de lajosidad y elongación de los agregados

Agregado	Índice de lajosidad (%)	Índice de elongación (%)
<i>Ra</i>	10.4	26.2
<i>Rb</i>	9.80	24.9
<i>g 6-20</i>	19.5	50.5
<i>g 10-30</i>	14.5	45.6

4.4. RESISTENCIA DE LOS AGREGADOS

La resistencia relativa de los agregados tiene influencia sobre el desarrollo de fisuración a través de los agregados, a menor resistencia mayor fractura de agregados. Por este motivo se realizó un ensayo de carga puntual mediante el cual se estimó la resistencia a compresión de los agregados.

En este caso se evaluaron tanto los agregados reciclados provenientes de la trituración de distintos hormigones (alta resistencia *Ra*, resistencia normal *Rb* y losas de pavimento levantadas en una obra vial *Rv*) como los agregados naturales *g 6-20* y *g 10-30*. Se seleccionaron entre 20 y 30 muestras de agregados por cada tipo de piedra a evaluar de acuerdo a las características requeridas para dicho ensayo.

Sobre las muestras seleccionadas se realizó el ensayo de carga puntual obteniéndose la carga de rotura P (kg) y posteriormente se determinó para cada una de ellas el índice de carga puntual I_s (kg/cm^2), el cual fue corregido por tamaño para obtener el índice estándar $I_s(50)$ (kg/cm^2). Finalmente se estimó la resistencia a compresión q_u (kg/cm^2) a partir del índice de carga puntual corregido por tamaño.

En el Anexo 1 se presentan los resultados individuales de dichos ensayos, mediante los cuales se calculó el índice de carga puntual como un promedio de todas las determinaciones y la resistencia a compresión estimada en función de dicho índice. En la Tabla 4.4 se muestran los valores del índice estándar de carga puntual y la resistencia a compresión calculados para cada agregado.

Puede observarse que comparado con los agregados naturales los agregados reciclados presentan una reducción significativa en la resistencia, existiendo escasas diferencias en la resistencia estimada para cada uno de ellos, a pesar de provenir de hormigones de distinto nivel resistente.

Tabla 4.4. Índice de carga puntual y resistencia estimada de los agregados

Agregado	Índice de carga puntual estándar $I_s(50)$	Resistencia a compresión estimada q_u
	(MPa)	(MPa)
<i>Ra</i>	2.4	52.8
<i>Rb</i>	2.5	54.0
<i>g 6-20</i>	9.5	208.5
<i>q 6-20</i>	5.2	114.4
<i>Rv</i>	2.7	60.0

4.5. CONCLUSIONES

El análisis granulométrico de los agregados permitió caracterizarlos para, posteriormente, reproducir las curvas granulométricas de los agregados reciclados *Ra* y *Rb* mediante una combinación de las tres fracciones de piedra partida granítica (*g 6-12*, *g 6-20* y *g 10-30*).

La absorción de agua resultó mayor en el material reciclado que en el natural, lo cual se debe fundamentalmente al mortero adherido a las partículas del agregado original. Asimismo los agregados reciclados presentaron menores valores de densidad que el agregado natural.

La calidad del hormigón original no influye considerablemente sobre la absorción y densidad de los agregados reciclados. Los agregados reciclados *Ra* y *Rb* obtenidos de la trituración de hormigones de distinta calidad ($a/c=0.30$ y $a/c=0.50$)

tienen valores similares de absorción y densidad. A su vez el reciclado proveniente de la obra vial (R_v) presenta mayor absorción y menor densidad que los reciclados R_a y R_b . Esto se debe a la diferencia de absorción del agregado natural con el cual fueron elaborados los hormigones de origen (piedra partida granítica o cuarcítica).

Los agregados reciclados presentan porcentajes inferiores de partículas lajosas como así también de partículas elongadas, lo que puede modificar el mecanismo de rotura del hormigón reciclado.

Cabe destacar que los valores obtenidos en las determinaciones de las propiedades físicas de los agregados reciclados se encontraron dentro de los límites especificados en los reglamentos vigentes (CIRSOC 201) para los agregados naturales de densidad normal a emplear en hormigones, a pesar de que dichas exigencias no están pensadas para este nuevo material.

Con respecto a sus propiedades mecánicas puede observarse que, comparado con los agregados naturales, los agregados reciclados presentan una reducción significativa en la resistencia. Asimismo puede observarse que hay escasas diferencias en la resistencia estimada de los distintos agregados reciclados. Esto puede justificarse considerando la evolución de la resistencia con el tiempo y la eliminación de partículas más débiles durante el proceso de trituración de los agregados.

Capítulo 5

EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA MATRIZ-AGREGADO

En este capítulo se presenta un estudio comparativo sobre el desarrollo de adherencia en los agregados naturales y reciclados. El objetivo principal fue obtener información básica sobre los niveles de adherencia matriz-agregado que sirvan de base para analizar posteriormente los mecanismos de fractura en hormigón reciclado. Las variables analizadas incluyen, entre otras, las características de las superficies de adherencia (fracturadas o cortadas) y los niveles de resistencia, tanto de la matriz como del hormigón de origen de los agregados reciclados.

5.1. MATERIALES Y MEZCLAS

Se utilizaron como agregado trozos de granito (*g*), trozos de hormigón provenientes de dos hormigones de calidad conocida (relación *a/c* 0.30 y 0.50) (*Ra* y *Rb*) y un hormigón de origen desconocido (*Rd*), todos elaborados con piedra partida granítica, como así también restos de barras de morteros previamente ensayadas a flexión (*Ma* y *Mb*). En el caso de los hormigones reciclados la obtención de los prismas se realizó mediante corte con sierra de probetas de hormigón. Los bloques de granito fueron aserrados de planchas de roca. Los prismas de mortero reciclado fueron directamente moldeados.

Como forma de caracterización se determinaron además de la resistencia a flexión (módulo de rotura), la absorción de agua a 24 horas y la densidad saturada y superficie seca de los mismos. En la Tabla 5.1 se muestran la identificación adoptada y las características de los distintos tipos de agregados (absorción, densidad y módulo de rotura).

Tabla 5.1. Características de los agregados

Agregado	Absorción (%)	Densidad	Módulo de rotura (MPa)
Granito (<i>g</i>)	0.4	2.65	11.7
Reciclado a/c = 0.30 (<i>Ra</i>)	4.8	2.53	7.2
Reciclado a/c = 0.50 (<i>Rb</i>)	5.0	2.38	6.0
Reciclado desconocido (<i>Rd</i>)	5.1	2.50	4.8
Mortero reciclado a/c = 0.30 (<i>Ma</i>)	6.1	2.18	8.8
Mortero reciclado a/c = 0.50 (<i>Mb</i>)	7.4	2.23	7.4

La textura superficial requerida en cada caso fue lograda mediante la aplicación de diferentes técnicas: cortado, arenado y fracturado. Para el caso del hormigón se utilizaron superficies cortadas y fracturadas. Las superficies cortadas (C) fueron obtenidas mediante corte con disco diamantado y se caracterizan por su superficie lisa. Las caras fracturadas (F) fueron resultantes del ensayo de flexión de los prismas y presentaron una superficie más rugosa con texturas diferentes entre sí debido a la presencia de los agregados originales. Para el caso de los morteros se utilizaron superficies fracturadas, también resultantes de un ensayo de flexión, pero se observaron grados de rugosidad similares entre sí. En el caso del granito se usaron superficies con una rugosidad similar a la piedra partida granítica, obtenidas mediante el arenado de las caras de ensayo previamente cortadas con sierra (Ao).

Para la confección de las probetas compuestas por matriz y agregado se elaboraron tres tipos de mortero, uno con razón a/c 0.50 (mortero de resistencia normal) y dos con relación a/c entre 0.30 y 0.35 (morteros de alta fluidez y resistencia). La fluidez deseada, para el caso de los morteros de alta fluidez, se alcanzó utilizando un aditivo superfluidificante destinado a la elaboración de hormigón autocompactable, mezcla de un aditivo reductor de agua de alto rango junto con un agente modificador de la viscosidad. En ambos casos se siguió la misma metodología de mezclado. La Tabla 5.2 muestra los morteros elaborados para cada razón a/c, en donde se indica la relación arena/cemento y el porcentaje de aditivo utilizado.

En todos los casos se empleó un cemento fillerizado y una arena Argentina (módulo de finura 1.49) combinada con una arena Oriental (módulo de finura 2.69). En el mortero convencional (M1) se utilizó una mezcla en relación 80 % de arena Oriental y 20 % de arena Argentina, con un módulo de finura de 2.47. Esta relación fue modificada para los morteros de mayor fluidez (M2-1 y M2-2), utilizándose una

proporción de 60 % de arena Oriental y 40 % de arena Argentina, con un módulo de finura de 2.24, ya que el uso de una arena más fina permite reducir el volumen de pasta de dichos morteros alcanzando la fluidez deseada sin segregar. En la Tabla 5.3 se resumen los valores obtenidos para cada arena, donde se muestran los porcentajes retenidos acumulados por cada tamiz y el módulo de finura, y en la Figura 5.1 se muestran las curvas granulométricas.

Tabla 5.2. Morteros elaborados

Mezcla	Relación a/c	Relación arena/cemento	% Aditivo utilizado
M1	0.50	2.2	-
M2-1	0.35	1.5	0.75
M2-2	0.30	1.8	0.40

Tabla 5.3. Granulometría de las arenas

Abertura tamiz (mm)	% retenido acumulado			
	AA	AO	80-20	60-40
37,50	0	0	0	0
26,50	0	0	0	0
19,00	0	0	0	0
13,20	0	0	0	0
9,50	0	0	0	0
4,75	0	0	0	0
2,36	0	6	5	4
1,18	1	19	16	12
0,60	5	56	46	36
0,30	66	88	84	79
0,15	89	98	96	93
0,074	100	100	100	99
Módulo de finura	1.61	2.67	2.47	2.24

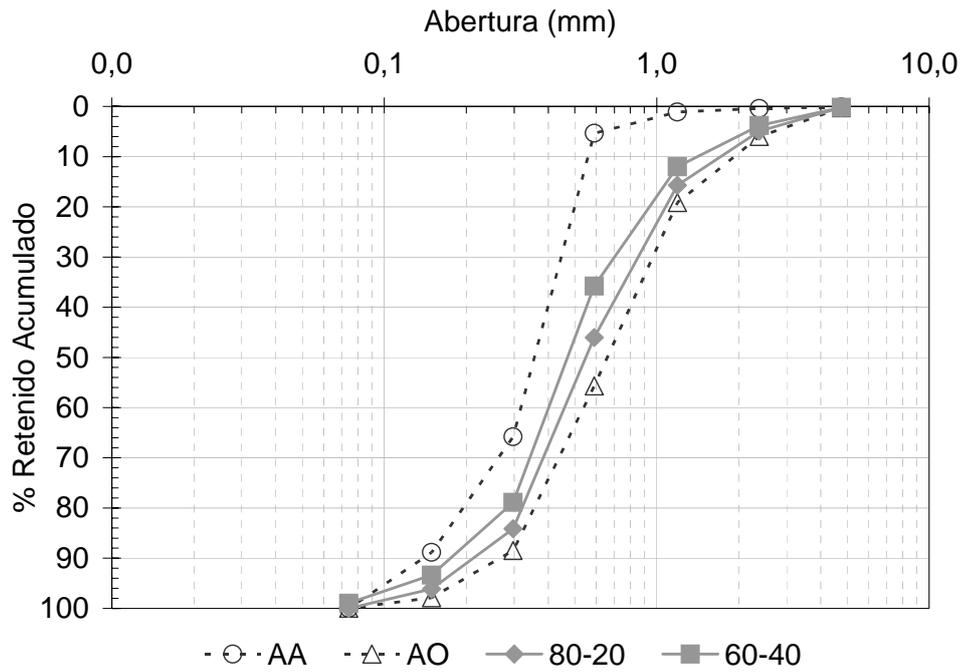


Figura 5.1. Curvas granulométricas de las arenas

5.2. PROGRAMA DE ENSAYOS

Se moldearon probetas compuestas por el mortero M1 (resistencia normal) y todos los agregados disponibles (*g*, *Ra*, *Rb*, *Rd*, *Ma* y *Mb*), a fin de evaluar tanto la variación entre los agregados naturales y reciclados como la relación entre las distintas texturas superficiales (principalmente C/F). Del mismo modo se moldearon probetas con los morteros de elevada fluidez (M2-1 y M2-2) y los agregados *g*, *Ra*, *Rb* y *Rd* para considerar la influencia de la matriz y el tipo de agregado, sin evaluar en este caso el efecto de la textura superficial. La Tabla 5.4 muestra el programa de ensayos indicando, para cada mortero (matriz), el agregado utilizado para la confección de las probetas y la textura de dichos agregados.

Las probetas fueron curadas en agua saturada con cal hasta la edad de ensayo adoptada (14 días). En forma simultánea a los ensayos de adherencia se midió la resistencia a flexión de la fase mortero (matriz) y la resistencia de la fase agregado. Todos los ensayos se realizaron en una máquina de deformación controlada empleando una velocidad de desplazamiento de 0.2 mm/min.

Tabla 5.4. Programa de ensayos

Matriz	Agregado	Textura
M1	Granito (<i>g</i>)	Arenado (<i>Ao</i>)
	Reciclado a/c = 0.30 (<i>Ra</i>)	Cortado (<i>C</i>)
		Fracturado (<i>F</i>)
	Reciclado a/c = 0.50 (<i>Rb</i>)	Cortado (<i>C</i>)
		Fracturado (<i>F</i>)
	Reciclado desconocido (<i>Rd</i>)	Cortado (<i>C</i>)
		Fracturado (<i>F</i>)
Mortero reciclado a/c = 0.35 (<i>Ma</i>)	Fracturado (<i>F</i>)	
Mortero reciclado a/c = 0.50 (<i>Mb</i>)	Fracturado (<i>F</i>)	
M2-1	Granito (<i>g</i>)	Arenado (<i>Ao</i>)
	Reciclado desconocido (<i>Rd</i>)	Cortado (<i>C</i>)
M2-2	Granito (<i>g</i>)	Arenado (<i>Ao</i>)
	Reciclado a/c = 0.30 (<i>Ra</i>)	Cortado (<i>C</i>)
	Reciclado a/c = 0.50 (<i>Rb</i>)	Cortado (<i>C</i>)

5.3. RESULTADOS Y ANALISIS

El la Tabla 5.5 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos de adherencia. En ella se incluyen los resultados de resistencia a flexión de los morteros (MMR), módulo de rotura de las interfaces (IMR) y la adherencia relativa de las interfaces, la cual se expresa como el módulo de rotura de la interfaz referido al módulo de rotura del mortero (IMR/MMR). Los valores informados son promedio de un mínimo de 10 determinaciones. Se indica el coeficiente de variación, que se encuentra por debajo del 10 % en el caso del mortero y es mayor en el caso de las interfaces. También se incluyen las relaciones entre la adherencia medida sobre las superficies cortadas y las fracturadas (C/F).

Los valores mostrados en dicha tabla reflejan la mayor debilidad de la interfaz frente a las dos fases componentes (mortero y agregado), evidenciada por un menor módulo de rotura (IMR). Con respecto al tipo de agregado, se observan mayores valores de adherencia de interfaces en el caso de los agregados reciclados y de los morteros, siendo mayor en los agregados reciclados (*Ra*, *Rb* y *Rd*) que en los morteros (*Ma* y *Mb*).

Tabla 5.5. Resultados ensayos adherencia matriz-agregado

Matriz	Agregado	Textura	Matriz		Interfaces		IMR/MMR	C/F
			MMR (MPa)	COV (%)	IMR (MPa)	COV (%)		
M1	<i>g</i>	Ao	6.6	4	2.3	27	0.35	-
	<i>Rd</i>	C			2.4	26	0.36	0.69
	<i>Rd</i>	F			3.5	20	0.53	
	<i>Ra</i>	C			4.0	22	0.61	0.80
	<i>Ra</i>	F			5.0	18	0.76	
	<i>Rb</i>	C			3.3	22	0.50	0.72
	<i>Rb</i>	F			4.6	18	0.70	
	<i>Ma</i>	F			3.0	16	0.45	-
	<i>Mb</i>	F			3.9	15	0.59	-
M2-1	<i>g</i>	Ao	8.8	5	4.4	26	0.50	-
	<i>Rd</i>	C			5.8	12	0.66	-
M2-2	<i>g</i>	Ao	8.1	7	3.7	27	0.46	-
	<i>Ra</i>	C			4.4	21	0.54	-
	<i>Rb</i>	C			4.0	21	0.49	-

Considerando las relaciones IMR/MMR se aprecia que la adherencia matriz-agregado oscila entre un 35 % y un 75 % de la resistencia a flexión del mortero, dependiendo tanto de la naturaleza del agregado como de la textura superficial de los mismos. Se verifica que con los agregados reciclados las superficies fracturadas desarrollan mayor adherencia que las cortadas debido a la mayor rugosidad de las superficies fracturadas. Las relaciones C/F se encuentran entre 0.69 y 0.80, valores que resultan bastante mayores que los encontrados para el agregado granítico, para el cual se obtuvieron en experiencias previas en el LEMIT relaciones cercanas a 0.40 (Giaccio et al 1985).

En el Anexo 2 (A, B y C) se muestran los resultados de todos los ensayos realizados los cuales incluyen, además de los ensayos de adherencia, la resistencia a flexión de la fase mortero (matriz) y la resistencia de la fase agregado.

5.4. CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental desarrollado surge que la adherencia matriz-agregado en el hormigón reciclado es mayor o igual a la encontrada con los agregados naturales de mayor uso en la región (granito), tanto para las superficies

cortadas como para las fracturadas. Asimismo los valores obtenidos reflejan, como era previsible, la mayor debilidad de la interfaz frente a las dos fases componentes (mortero y agregado), evidenciada por un menor módulo de rotura (IMR).

Comparando la influencia de la textura superficial en los agregados reciclados se observa que sobre las superficies cortadas se encontraron valores de adherencia menores que en las superficies fracturadas. Se destaca que esta diferencia es mayor que la encontrada para el agregado granítico en las experiencias previas mencionadas.

Capítulo 6

MECANISMO DE ROTURA EN TRACCIÓN

En este capítulo se analiza el mecanismo de rotura en tracción. Se elaboraron hormigones con diferentes relaciones agua/cemento elaborados con piedra partida granítica y hormigones con dos tipos de agregado reciclado de diferente nivel de resistencia, caracterizados previamente. Se evaluó la resistencia y deformabilidad en flexión sobre vigas entalladas, la resistencia a compresión diametral y, complementariamente, la resistencia a compresión. Además se analizó la estructura de cada hormigón considerando la distribución y estado de los agregados e interfaces. Los resultados permiten discutir la incidencia que poseen la adherencia de interfaces y la resistencia relativa de las fases componentes sobre el mecanismo de rotura del hormigón.

6.1. MATERIALES Y MEZCLAS

Este estudio se planteó en el mesonivel estructural considerando al hormigón como un material compuesto por agregados gruesos y mortero, vinculados a través de las interfaces. Se realizaron 3 series de hormigones con niveles de resistencia a compresión de aproximadamente 18, 37 y 48 MPa (Serie 1, Serie 2 y Serie 3 respectivamente).

En cada serie se elaboró un hormigón con piedra partida granítica (*g*), identificado como G, y dos hormigones que reemplazan el 100 % del agregado grueso por dos agregados reciclados diferentes (*Ra* y *Rb*), identificados como A y B. Los agregados reciclados fueron obtenidos a partir de la trituración de hormigones con distintos niveles de resistencia del orden de 55 ± 5 MPa y 30 ± 5 MPa elaborados con piedra partida granítica. Sólo fue utilizada la fracción gruesa de dichos agregados. En la Tabla 6.1 se muestra un resumen de las propiedades de los agregados utilizados, incluyendo absorción de agua a 24 horas, densidad saturada a superficie seca (D_{ss}), índice de carga puntual y resistencia a compresión estimada con dicho índice. Se

observa que los agregados reciclados utilizados presentan mayor absorción, menor densidad y una considerable pérdida de resistencia comparados con la piedra partida granítica. Las pequeñas diferencias en las propiedades físicas y en la resistencia a compresión estimada para los agregados reciclados se justifica considerando la evolución de la resistencia en el tiempo y la eliminación de las partículas más débiles durante el proceso de trituración.

Tabla 6.1. Propiedades de los agregados gruesos

Agregado	Absorción (%)	D _{ss}	Indice de carga puntual estándar <i>I_s</i> (50) (MPa)	Resistencia a compresión estimada <i>q_u</i> (MPa)
<i>g</i>	0.4	2.65	9.5	208.5
<i>Ra</i>	4.8	2.53	2.4	52.8
<i>Rb</i>	5.0	2.38	2.5	54.0

Las diferencias en el tamaño de los agregados poseen un efecto considerable en el mecanismo de rotura del hormigón, por tal motivo, y para asegurar que la principal diferencia entre los hormigones fuera el nivel de resistencia de las fases componentes, se ajustó la granulometría de estos últimos. En la Figura 6.1 se aprecia la distribución de tamaños de los mismos. El ajuste de la piedra partida granítica se realizó combinando varias fracciones, 15% de piedra con tamaño 6-12 mm más 70% de piedra tamaño 6-20 mm más 15% de piedra 10-30 mm.

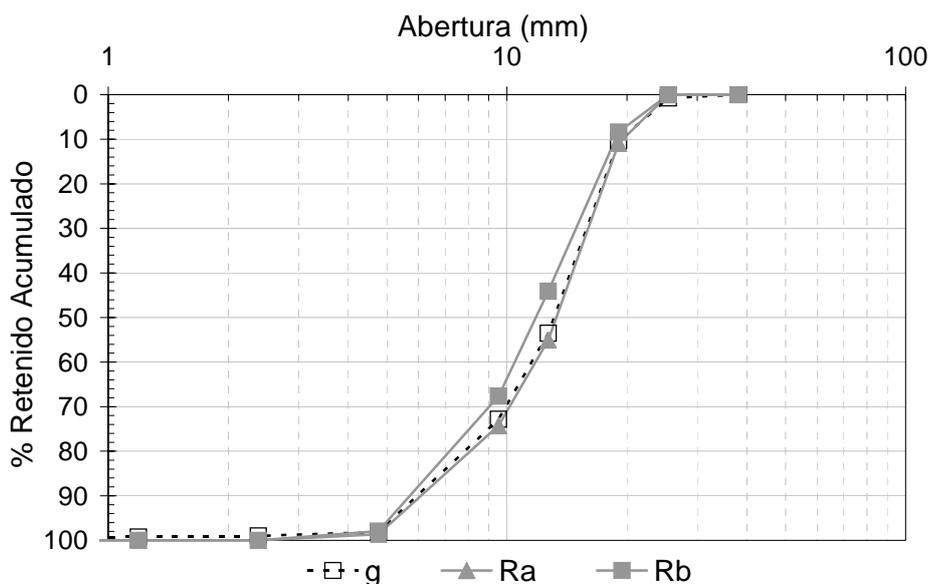


Figura 6.1. Curvas granulométricas de los agregados gruesos naturales y reciclados

La mayor porosidad de los agregados reciclados aumenta el intercambio de agua con la pasta de cemento circundante. Según el contenido de humedad o grado de saturación de las partículas, el agregado reciclado puede absorber o proporcionar agua a la matriz. Este hecho impone algunas limitaciones en comparación con el hormigón con agregados naturales. Si el agregado reciclado es usado en condición seca el contenido de agua en el mortero puede reducirse y si el agregado reciclado está saturado la relación agua/cemento de la matriz se puede incrementar ligeramente. Por esta razón los contenidos de agua se ajustaron de forma tal de lograr grados de trabajabilidad comparables. Asimismo, para disminuir el intercambio de agua de los agregados con la pasta de cemento circundante estos se incorporaron saturados. Para tal fin los agregados gruesos, tanto el natural como los reciclados, se sumergieron en agua durante 24 horas y luego se dejaron escurrir permaneciendo una hora al aire antes de elaborar el hormigón. Sobre el hormigón fresco se determinaron el peso unitario (PUV), el asentamiento y el contenido de aire incorporado. En la Tabla 6.2 se presentan las proporciones e identificación de los hormigones elaborados.

Tabla 6.2. Hormigones elaborados

Hormigón	Serie 1			Serie 2			Serie 3		
	f'c ~ 18 MPa			f'c ~ 37 MPa			f'c ~ 48 MPa		
	G-18	A-18	B-18	G-37	A-37	B-37	G-48	A-48	B-48
Relación a/c	0.70	0.67	0.67	0.35	0.35	0.36	0.34	0.34	0.34
Agua (kg/m ³)	184	178	174	149	148	153	155	152	152
Cemento (kg/m ³)	263	264	262	431	427	423	452	443	442
Ag. fino (kg/m ³)	835	835	830	765	760	755	875	855	860
Ag. Grueso natural (kg/m ³)	1080	--	--	1060	--	--	960	--	--
Ag. Grueso reciclado (kg/m ³)	--	1030	1020	--	1000	--	--	885	885
Aditivo (kg/m ³)	No	No	No	4.2	4.2	4.1	4.8	3.9	3.8
Asentamiento (mm)	130	135	115	175	140	110	100	100	110
Aire (%)	1.5	1.0	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	3.0	3.0
PUV (kg/m ³)	2360	2310	2290	2400	2340	2320	2440	2340	2330

Con el objetivo de comparar el efecto del agregado grueso sobre el mecanismo de falla del hormigón, el volumen de agregado grueso se mantuvo constante en cada una de las series de diferente nivel resistente. El resto de los materiales fue similar en todos los casos, empleando un cemento portland compuesto (Series 1 y 2: lote 1;

Serie 3: lote 2) y arena silíceas naturales, mezcla de un 80 % de arena Oriental y un 20 % de arena Argentina, con un módulo de finura de 2.47. En las series con niveles de resistencia de 37 y 48 MPa (Serie 2 y Serie 3) se utilizó un aditivo superfluidificante, mezcla de un aditivo reductor de agua de alto rango junto con un agente modificador de la viscosidad.

6.2. DETALLES EXPERIMENTALES

Para evaluar las propiedades mecánicas en tracción y compresión se moldearon cilindros y prismas. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda hasta la edad de ensayo (28 días). En las Series 1 y 2 se moldearon para cada hormigón cilindros de 150 x 300 mm para ensayos de compresión, evaluando la resistencia a compresión del hormigón (f'_c) y el módulo de elasticidad (E). Complementariamente se procedió al tamizado del hormigón fresco a través de una malla de 4.8 mm y con el mortero resultante se moldearon cilindros de 50 x 100 mm que se utilizaron para valorar el nivel de resistencia de la matriz (f'_{cM}). En la Serie 3 se moldearon para cada hormigón cilindros de 100 x 200 mm. Se moldeó un mínimo de 4 cilindros en cada caso.

Asimismo en las tres series se realizaron ensayos de flexión con carga central sobre prismas de 75 x 105 x 430 mm, entallados hasta la mitad de la altura, empleando una luz de apoyo de 400 mm. A partir de las curvas carga-flecha se determinaron como resultados la resistencia a flexión (f_{net}), la energía de fractura (G_F) y la longitud característica (l_{ch}) siguiendo los lineamientos del comité RILEM 50-FMC (ver capítulo 3). Complementariamente se registraron las curvas carga-apertura de fisura (CMOD).

Sobre las mitades resultantes del ensayo de flexión se realizaron ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}). A la vez sobre otros fragmentos se determinaron la absorción y densidad de cada hormigón. Finalmente se analizaron las superficies de fractura observando la distribución y estado de los agregados y de las interfaces.

6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 6.3 y 6.4. Para cada uno de ellos se indican los valores promedio y debajo el coeficiente de variación COV (%).

En primer lugar se observa que los hormigones elaborados con los agregados reciclados incrementan la absorción y reducen la densidad, lo que se verifica para las tres series (resistencia de 18, 37 y 48 MPa).

Tabla 6.3. Resultados de los ensayos. Propiedades físicas

	G-18	A-18	B-18	G-37	A-37	B-37	G-48	A-48	B-48
Abs (%)	5.6 4	7.4 7	7.6 4	4.5 7	6.0 4	6.3 1	3.5 2	5.4 5	5.5 1
Dsss	2.42 < 1	2.33 < 1	2.33 < 1	2.44 1	2.37 < 1	2.35 < 1	2.48 < 1	2.42 < 1	2.41 < 1

Tabla 6.4. Resultados de los ensayos. Comportamiento mecánico

	f'c_M (MPa)	f'c (MPa)	E (GPa)	Coef. de Poisson	f_{net} (MPa)	f_{cd} (MPa)	G_F (N/m)	l_{ch} (mm)	δ₀ (mm)
G-18	20.1 25	18.1 5	27.1 3	0.186 6	3.9 8	3.4 4	143 13	514	1.67 30
A-18	20.8 4	18.0 3	23.4 4	0.186 5.6	3.7 12	2.7 5	90 30	436	1.01 28
B-18	18.3 2	15.4 3	22.6 3	0.185 2	3.2 6	2.8 4	99 13	442	1.30 17
G-37	46.4 5	37.5 8	33.1 5	0.164 7	5.2 11	4.1 6	147 8	447	1.25 17
A-37	44.3 4	36.4 8	28.8 2	0.168 2.3	5.3 4	4.0 8	107 20	305	0.92 10
B-37	39.5 27	35.7 8	28.3 4	0.166 1.5	4.7 1	3.5 17	81 22	285	0.93 23
G-48	--	48.4 8	39.9 5	--	7.3 2	5.3 8	155 7	328	1.21 3
A-48	--	44.4 8	34.2 3	--	6.0 5	4.0 12	113 7	312	1.20 10
B-48	--	43.8 3	32.7 7	--	5.8 4	3.9 20	106 11	339	1.02 8

La Figura 6.2 muestra los resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad de cada hormigón. Puede observarse que, reemplazando la totalidad del agregado grueso por agregado reciclado, la resistencia a compresión es menor que para el hormigón con agregado natural. Estas diferencias son menores al 15 %, lo que

concuera con experiencias que indican disminuciones del 20 % en la resistencia a compresión cuando se utiliza 100 % de agregado reciclado (Gómez et al, 2001, Di Maio et al, 2002, Di Maio et al, 2004).

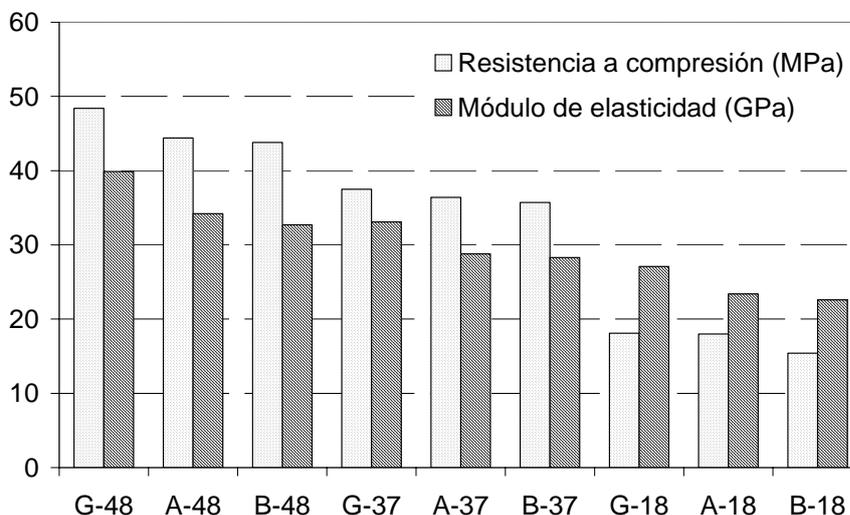


Figura 6.2. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad

Asimismo las reducciones de rigidez (E) son consistentes con dicha bibliografía. Se observa un menor módulo de elasticidad en los hormigones con agregados reciclados. Esta disminución fue superior a la observada en la resistencia a compresión.

Con respecto al coeficiente de Poisson no se observó una gran diferencia para los hormigones elaborados con agregados reciclados con respecto a cada hormigón G correspondiente. Esto está de acuerdo con estudios anteriores en hormigón con agregados reciclados con resistencias a compresión entre 20 y 30 MPa, donde no se observó un efecto significativo sobre el mecanismo de rotura en compresión del hormigón (Di Maio et al, 2004).

Los valores de resistencia a tracción, tanto los determinados mediante el ensayo de flexión como por compresión diametral (f_{net} , f_{cd}), siguen la misma tendencia y las relaciones tracción/compresión no se modifican substancialmente entre los hormigones G y A o B de cada serie. Como era de esperar esta relación disminuyó a medida que aumentó el nivel resistente. La Figura 6.3a muestra la variación de la resistencia a tracción calculada mediante el ensayo de flexión en función de la

resistencia a compresión y la Figura 6.3b compara los resultados de resistencia a tracción obtenidos en flexión y en compresión diametral.

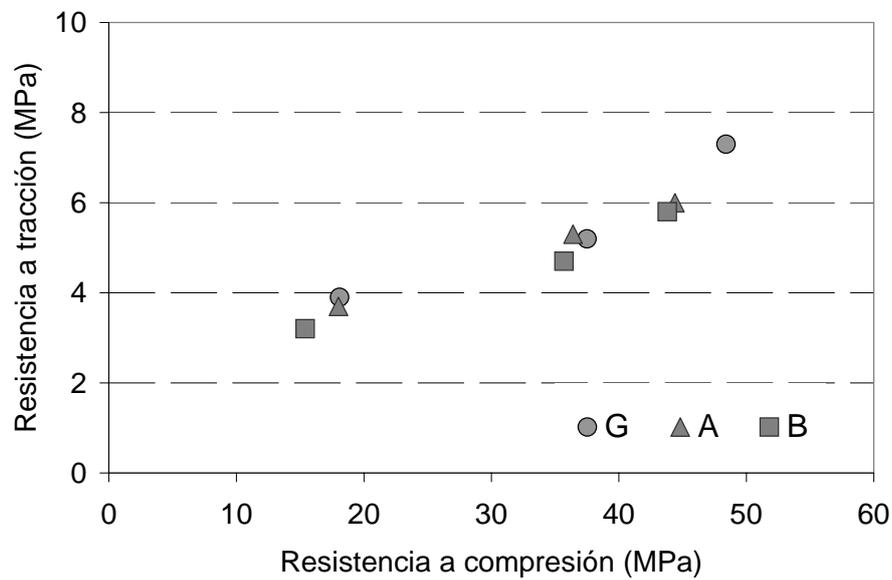


Figura 6.3a. Variación de la resistencia a tracción con la resistencia a compresión

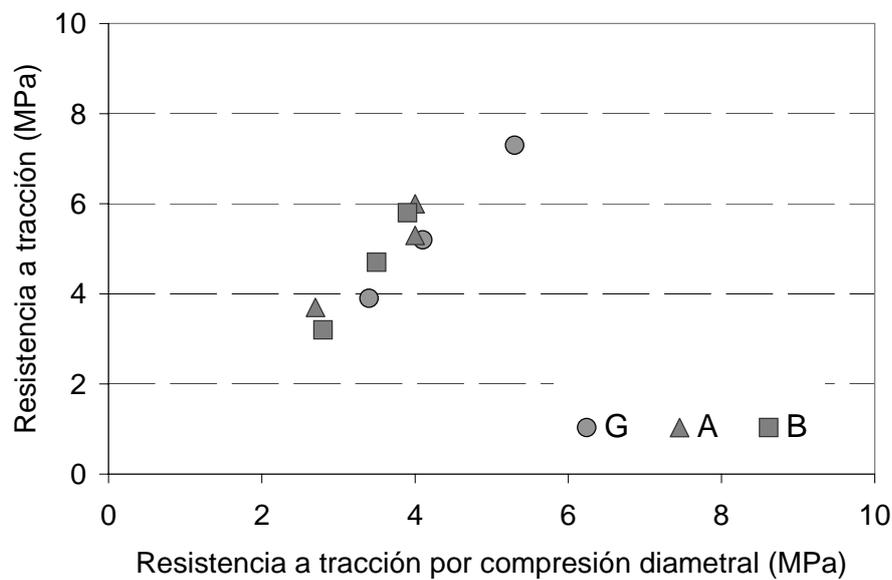


Figura 6.3b. Resistencia a tracción: flexión vs compresión diametral

A fin de facilitar el análisis en la Tabla 6.5 se han calculado las relaciones entre las propiedades de un mismo hormigón y en la Tabla 6.6 se muestran los valores relativos con respecto al hormigón G de la serie correspondiente.

Tabla 6.5. Relaciones entre propiedades

Hormigón	Relaciones entre propiedades				
	$f_{cd}/f'c$	$f_{net}/f'c$	$G_F/f'c$	$I_{ch}/f'c$	$f'c_M/f'c$
G-18	0.19	0.22	7.9	18.5	1.11
A-18	0.15	0.21	5.0	16.1	1.16
B-18	0.18	0.21	6.4	18.5	1.19
G-37	0.11	0.14	3.9	7.7	1.24
A-37	0.11	0.15	2.9	5.3	1.22
B-37	0.10	0.13	2.3	5.2	1.11
G-48	0.11	0.15	3.2	6.8	--
A-48	0.09	0.14	2.6	7.0	--
B-48	0.09	0.13	2.4	7.4	--

Tabla 6.6. Valores relativos al hormigón G

Hormigón	Valores relativos al hormigón G							
	f_{cd}	$f'c_M$	$f'c$	E	f_{net}	G_F	I_{ch}	δ_0
G-18	1	1	1	1	1	1	1	1
A-18	0.79	1.03	0.99	0.86	0.95	0.63	0.86	0,61
B-18	0.82	0.91	0.85	0.83	0.82	0.69	0.85	0.78
G-37	1	1	1	1	1	1	1	1
A-37	0.98	0.95	0.97	0.87	1.02	0.73	0.67	0.74
B-37	0.85	0.85	0.95	0.85	0.90	0.55	0.65	0.74
G-48	1	--	1	1	1	1	1	1
A-48	0.75	--	0.92	0.86	0.82	0.73	0.95	0.99
B-48	0.74	--	0.90	0.82	0.79	0.68	1.03	0.84

Se puede apreciar que la reducción en el módulo de elasticidad (E) es mayor que en resistencia, como se dijo anteriormente, y que existe una tendencia que indica que se produce mayor reducción en la resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}) lo que puede implicar que la incidencia de la adherencia, resistencia y rigidez diferencial de las fases componentes sea distinta en este caso.

Asimismo se observa que se reducen la energía de fractura (G_F) y el tamaño de la zona de fractura (I_{ch}). Esto es coherente con antecedentes donde se observó un

aumento de la fragilidad relativa en hormigones con agregados con substanciales mejoras en la adherencia y compatibilidad elástica con la fase mortero, como es el caso de los agregados reciclados (Giaccio and Zerbino, 1998, García-Alvarez et al, 2003).

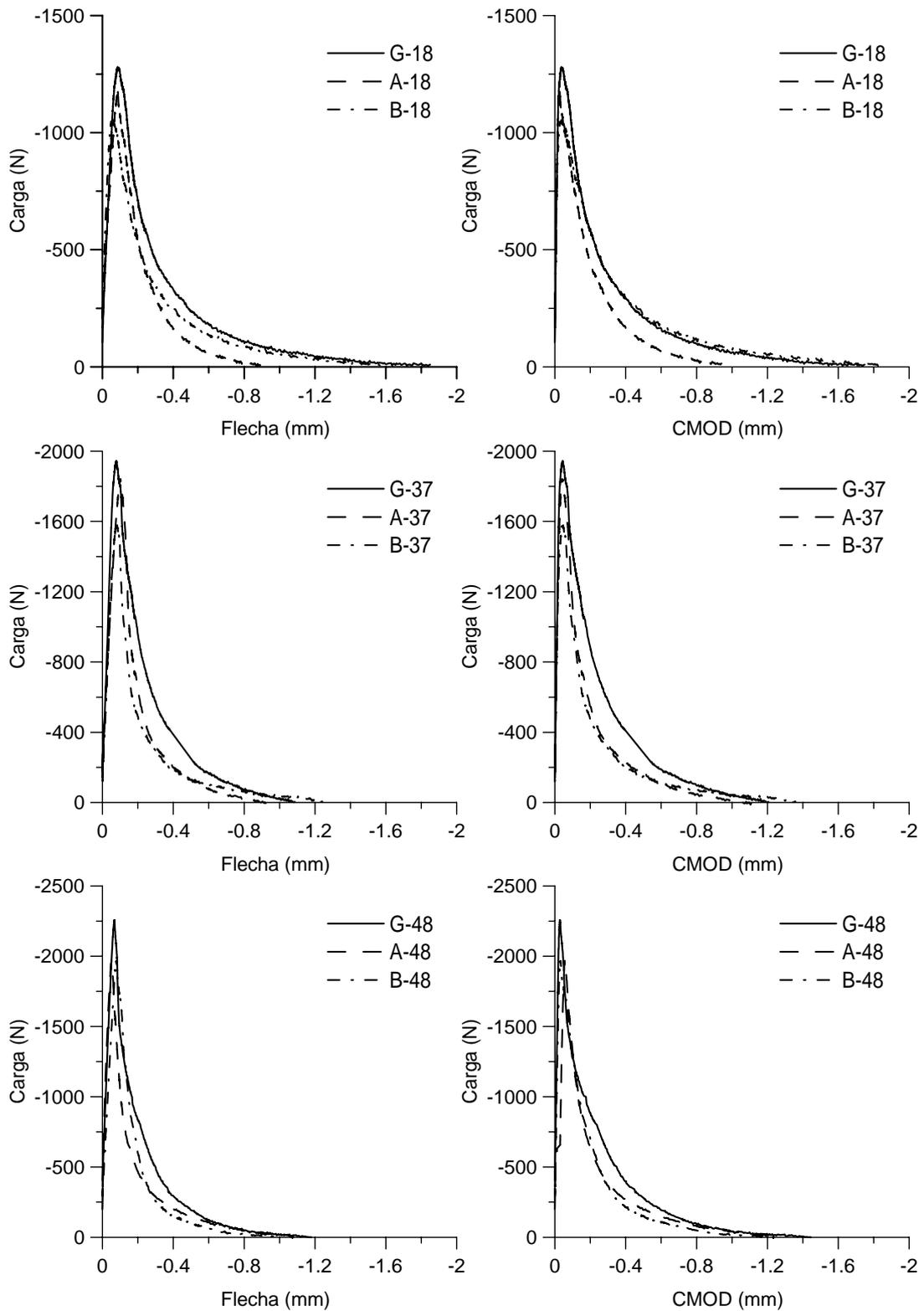


Figura 6.4. Curvas carga-flecha y carga-apertura de fisuras

En la Figura 6.4 se presentan curvas típicas carga-flecha y carga-CMOD. Se observa que los hormigones con agregados reciclados poseen una curva de ablandamiento más abrupta. Este comportamiento, que puede ser atribuido a una mayor cantidad de fractura a través de los agregados y una menor ramificación en el proceso de propagación de fisuras, se da con mayor intensidad a medida que crecen los niveles de resistencia (Series 2 y 3). En el Anexo 3 se muestran las curvas individuales.

En la Figura 6.5 se muestra la variación de la energía de fractura con la resistencia a compresión. Como se mencionó anteriormente la energía de fractura G_F se incrementa cuando se incrementa la resistencia, tanto para el hormigón con agregado natural como para los dos hormigones con agregados reciclados. Sin embargo se tienen pérdidas en la energía de fractura para los hormigones reciclados mayores al 20 % con respecto al hormigón con agregado natural. Estas reducciones son mayores que las encontradas en rigidez y en resistencia a tracción y compresión. El desplazamiento final de las vigas también decrece para los hormigones con agregados reciclados (como se aprecia en las Tablas 6.3 y 6.5), lo que hace evidente la reducción en la ramificación y tortuosidad de las grietas durante el proceso de fractura del hormigón reciclado.

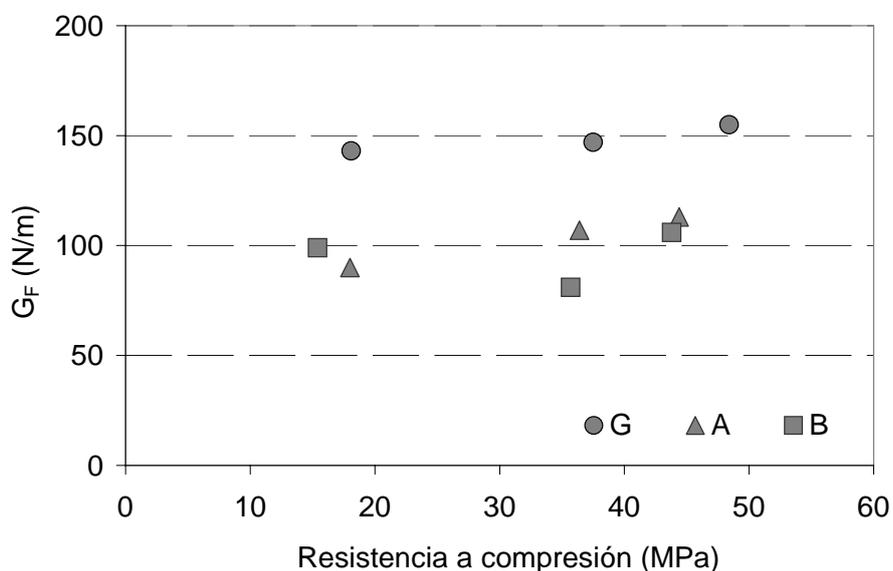


Figura 6.5. Variación de la energía de fractura con la resistencia a compresión

La Figura 6.6 muestra la variación de la longitud característica con la resistencia a compresión. Se observa que este parámetro, representativo del tamaño

de la zona de fractura, decrece en los hormigones con agregados reciclados. Asimismo en la serie de mayor resistencia se reducen las diferencias entre la longitud característica del hormigón convencional y los hormigones reciclados.

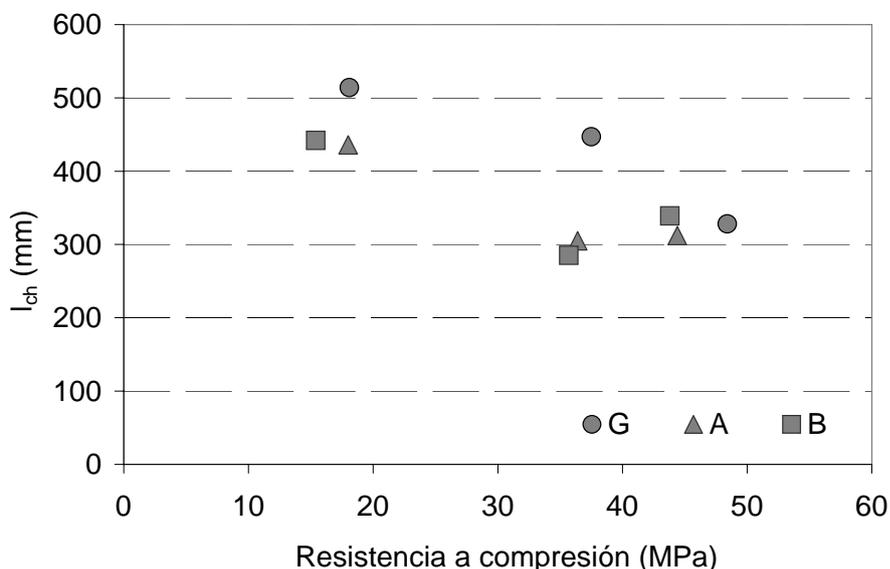


Figura 6.6. Variación de la longitud característica con la resistencia a compresión

Con el propósito de contribuir al análisis de los mecanismos de falla que pueden tener lugar en los hormigones estudiados, se realizó un relevamiento de las superficies de fractura luego de los ensayos de tracción por compresión diametral. Se realizó el conteo de agregados gruesos en cada sección, distinguiendo los agregados despegados (falla de interfaces) y los agregados fracturados (desarrollo de fisuras a través de los agregados). En la Tabla 6.7 se indican el porcentaje de agregados fracturados de cada hormigón.

Es posible observar que en los hormigones reciclados A y B existe un mayor desarrollo de fisuración a través de los agregados y un menor número de fallas de interfaces que en el caso del hormigón con agregado natural G. Esto se justifica considerando la menor resistencia de estos agregados y su mayor adherencia de interfaces, y se traduce en superficies de falla más planas. Comparando los distintos niveles de resistencia, se incrementa la rotura de agregados a medida que se incrementa la resistencia. Asimismo se observa que la densidad de agregados tiende a disminuir a medida que aumenta la resistencia del hormigón, lo cual está de acuerdo con la disminución en el contenido de agregados gruesos de las mezclas.

Tabla 6.7. Relevamiento de las superficies de rotura en tracción

Hormigón	Densidad superficial de los agregados * (%)	Agregados fracturados (%)	Agregados despegados (%)
G-18	40	41	59
A-18	27	57	43
B-18	30	58	42
G-37	36	51	49
A-37	26	55	45
B-37	28	63	37
G-48	29	59	41
A-48	20	86	14
B-48	16	73	27

* Área de los agregados mayores que 5 mm / área del hormigón

En la Figura 6.7 se presentan fotos de las superficies de rotura de las probetas sometidas al ensayo de compresión diametral. En la parte superior se muestra para cada serie una vista lateral de la probeta y en la parte inferior una vista frontal de toda la superficie (ancho: 75 mm, altura: 105 mm).

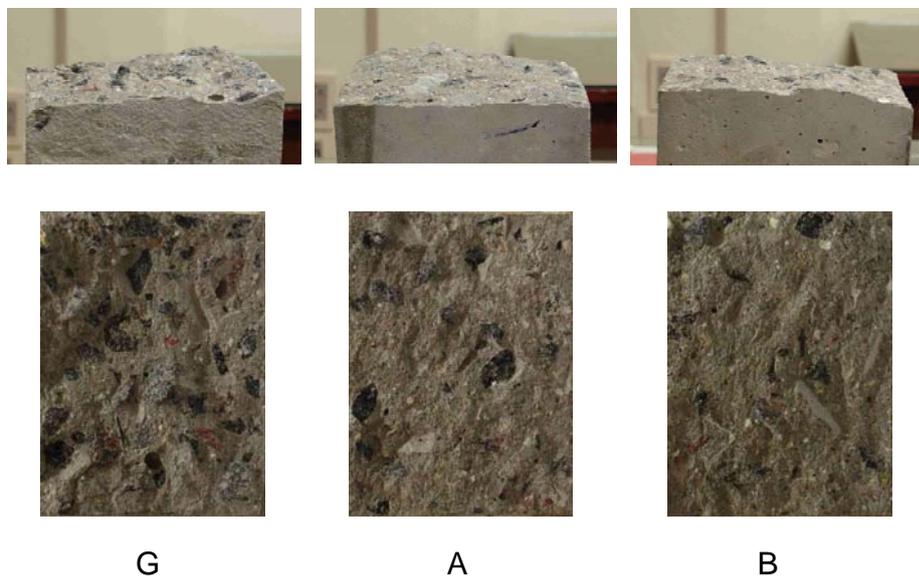


Figura 6.7. Serie 2: Superficies de fractura de los hormigones

Finalmente, es interesante observar que a pesar que los agregados reciclados fueron obtenidos de la trituración de hormigones de alta resistencia y de resistencia normal, los hormigones reciclados preparados con cada uno de ellos presentan un

comportamiento bastante similar. Este hecho se justifica considerando que la evolución de la resistencia en el tiempo y la eliminación de las partículas más débiles durante el proceso de trituración, generan agregados con propiedades similares (Tabla 6.1).

6.4. CONCLUSIONES

Los resultados evidencian que los aumentos en la adherencia y la reducción en rigidez que se producen cuando el agregado grueso natural se sustituye por agregado reciclado aumenta la compatibilidad elástica de las fases componentes del hormigón reciclado (mortero y agregados gruesos) lo que puede modificar el mecanismo de fractura. Esto se verificó en especial para los hormigones con niveles de resistencia intermedios, del orden de 30 a 40 MPa.

Comparando con un hormigón con agregados naturales e igual relación a/c , el uso de agregado grueso reciclado no modificó substancialmente la resistencia a tracción o compresión, mostrando una disminución más marcada en el módulo de elasticidad. Asimismo, hormigones con resistencia similar evidenciaron un descenso en la energía y tamaño de la zona de fractura, lo que indicaría una disminución en la ramificación y tortuosidad de grietas. Este hecho es consistente con el aumento en la fragilidad observado en hormigones con agregados naturales con importantes mejoras en la adherencia matriz-agregado y alta compatibilidad elástica de dichos agregados con el mortero.

Capítulo 7

CONSIDERACIONES FINALES

7.1. CONCLUSIONES

Del estudio de la bibliografía disponible se puede concluir que es posible elaborar hormigones con agregados reciclados que presenten un comportamiento resistente similar al de los hormigones convencionales. Desde el punto de vista mecánico el uso de agregados reciclados puede requerir incrementos en el contenido de agua del hormigón, pero si sólo se emplea la fracción gruesa del agregado las diferencias son mínimas. Desde este punto de vista los cambios en la demanda de agua pueden compensarse presaturando los agregados. En tal situación los efectos más importantes del uso de hormigón triturado como agregado reciclado se relacionarán con la deformabilidad del hormigón y con cambios en el mecanismo de fractura.

Con respecto a las propiedades de los agregados reciclados puede concluirse que estos presentan una absorción de agua mayor que los agregados naturales, lo cual se debe fundamentalmente al mortero adherido a las partículas del agregado original. Asimismo puede observarse que los agregados reciclados poseen valores de absorción similares entre sí, por lo que la capacidad de absorción de los agregados reciclados no se ve demasiado afectada por la razón agua/cemento del hormigón original pero si por el tipo de agregado con el cual fueron elaborados los hormigones de origen. En cuanto a la densidad, los agregados reciclados presentan menores valores que el agregado natural empleado en el hormigón original.

Con respecto a sus propiedades mecánicas cabe resaltar que los agregados reciclados presentan una menor resistencia que los agregados naturales de densidad normal comúnmente utilizados. Asimismo pueden observarse escasas diferencias en la resistencia estimada de los agregados reciclados, lo cual puede justificarse

considerando la evolución de la resistencia con el tiempo y la eliminación de partículas más débiles durante el proceso de trituración de los agregados.

A partir del estudio experimental desarrollado surge que la adherencia matriz-agregado en el hormigón reciclado es mayor o igual a la encontrada con los agregados naturales de mayor uso en la región (graníticos), tanto para las superficies cortadas como para las fracturadas. Las superficies fracturadas desarrollan mayor adherencia que las cortadas, debido a la mayor rugosidad que presentan.

Asimismo los valores obtenidos reflejan la mayor debilidad de la interfaz frente a las dos fases componentes (mortero y agregado), evidenciada por un menor módulo de rotura de la interfaz (IMR). Considerando las relaciones IMR/MMR (módulo de rotura de la interfaz/módulo de rotura de la matriz) la adherencia matriz-agregado osciló entre un 35% y un 75% de la resistencia a flexión del mortero, dependiendo tanto de la naturaleza del agregado como de la textura superficial de los mismos.

Con respecto a las propiedades físicas de los hormigones elaborados con agregados reciclados se observa que estos poseen mayor absorción y menor densidad que los hormigones con agregados naturales, lo que se verificó para las tres series de hormigones.

Los estudios llevados a cabo evidencian que, comparado con un hormigón con agregados naturales e igual relación a/c, el uso de agregado grueso reciclado no modifica substancialmente la resistencia a tracción o compresión, mostrando una disminución más marcada en el módulo de elasticidad. Se produce mayor reducción en la resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}) lo que puede implicar que la incidencia de la adherencia, resistencia y rigidez diferencial de las fases componentes sea distinta en este caso.

Los resultados muestran que los aumentos en la adherencia y la reducción en rigidez que se producen cuando el agregado grueso natural se sustituye por agregado reciclado aumenta la compatibilidad elástica de las fases componentes del hormigón reciclado (mortero y agregados gruesos). Estos cambios en las propiedades del hormigón influyen sobre su mecanismo de rotura, disminuyendo la energía y el tamaño de la zona de fractura. Esto se verificó en especial para los hormigones con niveles de resistencia intermedios, del orden de 30 a 40 MPa.

La energía de fractura G_F se incrementa a medida que aumenta la resistencia, tanto para el hormigón con agregado natural como para los dos hormigones con agregados reciclados. Sin embargo puede reducirse la energía de fractura para los hormigones reciclados con respecto al hormigón con agregado natural. Estas reducciones son mayores que las encontradas en rigidez y en resistencia a tracción y compresión. El desplazamiento final de las vigas también decrece para los hormigones con agregados reciclados lo que hace evidente la reducción en la ramificación y tortuosidad de las grietas durante el proceso de fractura del hormigón reciclado. La longitud característica, representativa del tamaño de la zona de fractura, decrece en los hormigones con agregados reciclados. Asimismo las diferencias entre la longitud característica del hormigón convencional y de los hormigones reciclados se reduce a medida que aumenta el nivel resistente.

En los hormigones con agregados reciclados se observa una curva de ablandamiento más abrupta. Este comportamiento puede ser atribuido a que los hormigones reciclados presentan un mayor desarrollo de fisuración a través de los agregados y un menor número de fallas de interfaces que en el caso del agregado natural, como así también a una menor ramificación en el proceso de propagación de fisuras. Esto se justifica considerando la menor resistencia de estos agregados y su mayor adherencia de interfaces, y se traduce en superficies de falla más planas. Comparando los distintos niveles de resistencia, se incrementa la rotura de agregados a medida que se incrementan los niveles de resistencia. La densidad de agregados tiende a disminuir a medida que aumenta la resistencia del hormigón, lo cual está de acuerdo con la disminución en el contenido de agregados gruesos de las mezclas.

Finalmente, es interesante destacar que a pesar que los agregados reciclados fueron obtenidos de la trituración de hormigones de alta resistencia y de resistencia media, los hormigones reciclados preparados con cada uno de ellos presentaron un comportamiento bastante similar. Este hecho se justifica considerando que, la evolución de la resistencia en el tiempo y la eliminación de las partículas más débiles durante el proceso de trituración, generan agregados con propiedades similares.

7.2. ESTUDIOS FUTUROS

Esta tesis tuvo como objetivo comprender el mecanismo de funcionamiento y fractura en hormigón con agregados reciclados, particularmente su mecanismo de rotura en tracción.

Un efecto importante del uso de agregados reciclados, además de los cambios en el mecanismo de fractura, se relacionará con la deformabilidad del hormigón tanto bajo cargas de corta como de larga duración. Por tales motivos sería significativo el estudio del comportamiento del hormigón reciclado bajo cargas de larga duración, con el objeto de desarrollar fundamentos para la predicción de la resistencia y deformabilidad.

En la bibliografía tanto nacional como internacional pueden encontrarse diversos trabajos sobre el comportamiento de hormigones elaborados en laboratorio con agregados reciclados en reemplazo de diferentes porcentajes del agregado natural, dejando un vacío con relación al comportamiento de los mismos en obra.

Por ello, considerando que el desempeño mostrado en laboratorio de los hormigones reciclados ha sido satisfactorio, sería interesante realizar experiencias de campo mediante la ejecución de distintos tipos de obras expuestas a diferentes condiciones ambientales de modo de poder tener un conocimiento más acabado sobre el comportamiento real de los hormigones reciclados.

Capítulo 8

BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 555 report, 2002, "Removal and Reuse of Hardened Concrete", ACI Materials Journal, May-June, pp. 300-325.
- ASTM C469-94, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
- ASTM C642-97, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
- Ajdukiewicz A. and Kliszczewicz, A., 2005, "Behaviour of RC beams and columns made of high-performance recycled aggregate concrete", Memorias Simposio fib "Structural Concrete and Time", La Plata, Argentina, pp. 705-712.
- Ajdukiewicz A. and Kliszczewicz, A., 2002, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", Cement and Concrete Composites, Vol. 24, N° 2, pp. 269-279.
- Akçaoğlu, T., Tokyay, M. and Çelik, T., 2004, "Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behaviour concrete under uniaxial compression", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, N° 6, pp. 633-638.
- Akçaoğlu, T., Tokyay, M. and Çelik, T., 2002, "Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression", Materials Letters, Vol. 57, N° 4, pp. 828-833.
- Buyle-Bodin, F. and Hadjieva-Zaharieva, R., 2002, "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete", Materials and Structures, Vol. 35, N° 252, pp. 504-509.
- Comisión Permanente del Hormigón, 2008, Instrucción Española Hormigón Estructural (EHE), "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados", Anexo 19.
- Cúneo Simian, H. A. y Durán, M. G., 1995, "Propiedades mecánicas y físicas de hormigones con agregados reciclados", 12º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, La Plata, Argentina, pp. 291-304.

- Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, R., 2002, "Hormigones con agregados reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 9, pp. 5-10.
- Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, 2004, "Hormigón con agregados reciclados: Resistencia, módulo de elasticidad y fluencia bajo cargas de compresión", Revista Hormigón N° 40, pp. 37-50.
- Di Maio, A.A., Gutierrez, F. y Traversa, L.P., 2001, "Comportamiento físico mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados", 14° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarria, Argentina, Tomo II, pp. 37-44.
- Di Maio, A. y Traversa, L. P., 2002, "Difusión de cloruros en hormigones reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 9, pp. 11-14.
- García-Alvarez, V. O., Giaccio, G, Zerbino, R. y Gettu, R., 2003, "Influencia del tipo de árido grueso sobre el mecanismo de fractura en hormigones normales y de alta resistencia", Cemento-Hormigón N° 857, pp. 40-54
- German Committee for Reinforced Concrete (DafStb), 1998, "Code: Concrete with Recycled Aggregates".
- Giaccio, G. and Zerbino, R., 1998, "Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level", Advanced Cement Based Materials, Evanston Illinois, Elsevier Ed. USA, Vol. 7, N° 1, pp. 41-48.
- Giaccio, G., Giovambattista, A. y Zerbino, R., 1990, "Adherencia en las interfaces agregado-matriz", Revista Hormigón N° 18, pp. 19-30.
- Giaccio, G., Rocco, C. and Zerbino, R., 1993, "The fracture energy (G_F) of High Strength Concretes", Materials and Structures, RILEM, Vol. 26, N° 161, pp. 381-386.
- Giaccio, G., Rocco, C., Violini, D., Zappitelli, J. and Zerbino, R., 1992, "High Strength Concretes incorporating different coarse aggregates". ACI Materials Journal, Vol. 89, N° 3, pp. 242-246.
- Giaccio, G. y Zerbino, R., 1997, "Interfaces en el hormigón: Efecto de la textura del agregado", Revista Hormigón N° 31, pp. 23-33.
- Giaccio, G. y Zerbino, R., 2005, "Mecanismo de rotura en compresión en hormigón reciclado", Revista Hormigón N° 41, pp. 25-38.
- Giaccio, G., Zerbino, R. y Giovambattista, A., 1985, "Adherencia agregado-matriz", Colloquia 85, Memorias "A", Tecnología de Materiales, Tomo I, pp. 251-262.
- Giovambattista, A. and Zerbino, R., 1993, "Creep of concrete after ten years loading", Fifth International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, E&FN SPON, 22, Londres, pp. 51-56.

- Gómez, J.M., Agullo, L. y Vasquez, E., 2001, "Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto". *Construcción y Tecnología*, Vol. XIII, N°157, pp. 10-22.
- 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, N° 8, pp. 1301-1311.
- Hansen, T.C., 1986, "The second RILEM state of the Art Report of Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete", *Materials and Structures*, Vol. 1, N°111, pp. 201-246.
- Hansen, T. C. and Narud, H., 1983, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", *Concrete International*, January, pp. 79-83.
- Hernández, C. y Fornasier, G., 2005, "Caracterización de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado", *Memorias Simposio fib "Structural Concrete and Time"*, La Plata, Argentina, pp. 833-840.
- International society for rock mechanics, Commission on testing methods Working group on revision of the point load test method, "Suggested method for determining point load strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 22, N° 2, 1985, pp. 51-60.
- Katz, A., 2003, "Properties of Concrete made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, N° 5, pp. 703-711.
- Limbachiya, M. C., Leelavat, T. and Dhir, R. K., 2000, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete". *Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 74-580.
- Machado, E. F. y Latterza, L. M., 1997, "Concreto com agregado gaúdo proveniente da reciclagem de residuos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de paines leves de vedação", *Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur*, Santa Fé, Argentina, pp. 207-218.
- Metin Husem, 2003, "The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete", *Materials Science and Engineering*, A363, pp. 152-158.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T. and Hisada, M., 2004, "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, N° 6, pp. 965-971.
- Norma IRAM 1505, 2003, "Agregados. Análisis granulométrico".
- Norma IRAM 1509, 1987, "Agregados para hormigones. Muestreo".

- Norma IRAM 1533, 2002, "Agregados gruesos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa, densidad relativa aparente y de la absorción de agua".
- Norma IRAM 1546, 1992, "Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión".
- Norma IRAM 1658, 1995, "Hormigón. Determinación de la Resistencia a Tracción Simple por Compresión Diametral".
- Norma IRAM 1687 Parte: 1, 1996, "Agregados. Parte1: Método de determinación del índice de lajosidad".
- Norma IRAM 1687 Parte: 2, 1997, "Agregados. Parte 2: Determinación del índice de elongación".
- Poon, C. S., Shui, Z. H. and Lam, L., 2004 a, "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete with recycled aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 18, N° 6, pp. 461-468.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H. and Kou, S. C., 2004 b, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, N° 1, pp. 31-36.
- Rasheeduzzafar and Khan, A., 1984, "Recycled concrete - A source for new aggregate", Journal Cement, Concrete and Aggregate, ASTM Journal, Vol. 6, N° 1, pp. 17-27.
- RILEM Recommendation: 121-DRG, 1994, "Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates, Materials and Structures", RILEM, Vol. 27, pp. 557-559.
- RILEM TC-50 FMC, 1985, "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams", Materials and Structures, Vol. 18, 106, pp. 285-290.
- Sagoe-Crentsil, K. and Taylor, A. H., 2001, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycle concrete aggregate", Cement and Concrete Research, Vol. 31, N° 5, pp. 707-712.
- Sri Ravindrarajah, R. and Tam, C.T., 1985, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol. 37, N°130, pp. 29-38.
- Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y.H. and Tam, C.T., 1987, "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 39, N°141, december, pp. 214-220.

- Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y.H. and Tam, C.T., 1988, "Strength evaluation of recycled concrete by in situ tests". *Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 289-295.
- Tam, V. W. Y., Gaob, X. F. and Tam, C. M, 2005, "Microstructural analysis of recycled concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, N° 6, pp. 1195-1203.
- Taus, V., 2003, "Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados", *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N° 10, pp. 7-16.
- Tavakoli, M. and Soroushian, P., 1996 a, "Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete", *Concrete International*, Vol. 18, N° 11, pp. 58-61.
- Tavakoli, M. and Soroushian, P., 1996 b, "Strength of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate", *ACI Materials Journal*, Vol. 93, N° 2, pp. 182-190.
- Vázquez, E. y Barra, M., 2002, "Reciclaje y reutilización del hormigón", *Monografía CIMNE: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón*, N° 67, pp. 43-65.
- Villagrán, Y., Taus, V., Zega, C., Di Maio, A, y Traversa, L., 2005, "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados y su influencia en la corrosión de armaduras", *Memorias Simposio fib "Structural Concrete and Time"*, La Plata, Argentina, pp. 91-98.
- Zega, C., 2003, "Hormigones reciclados", *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N° 10, pp. 65-71.
- Zega, C. y Taus, V., 2005, "Influencia del curado sobre las propiedades de transporte de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N° 12, pp. 47-56.
- Zega, C., Taus, V., Villagrán, Y. y Di Maio, A., 2005, "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", *Memorias Simposio fib "Structural Concrete and Time"*, La Plata, Argentina, pp. 761-768.
- Zerbino, R., 1998 a, "Adherencia matriz-agregado, mecanismos de deformación y rotura en hormigón", *1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón*, AATH, Buenos Aires, Argentina, pp. 135-148.
- Zerbino, R. 1998 b, "Rol de la adherencia matriz - agregado en el comportamiento del hormigón", *Tesis Doctoral*, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- Zerbino, R., 2002, "Disposición de residuos en materiales cementíceos" *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, N 9, pp. 3-4.

Anexo 1

ENSAYO DE CARGA PUNTUAL. RESISTENCIA

PIEDRA PARTIDA GRANÍTICA (g)

P (kg)	De (mm)	De² (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)	f'c (MPa)
301.2	17.448	304.4	9.70	0.623	6.04	132.8
339.1	18.599	345.9	9.61	0.641	6.16	135.4
386.6	19.86	394.4	9.61	0.660	6.34	139.5
475.2	20.522	421.2	11.06	0.670	7.41	162.9
403.5	18.232	332.4	11.90	0.635	7.56	166.2
457.7	19.06	363.3	12.35	0.648	8.00	176.0
463.5	18.77	352.3	12.89	0.643	8.30	182.5
461.5	17.897	320.3	14.12	0.630	8.89	195.6
639.1	21.803	475.4	13.18	0.688	9.07	199.5
707.1	22.908	524.8	13.20	0.704	9.29	204.5
479.7	17.504	306.4	15.34	0.624	9.57	210.5
629.4	20.758	430.9	14.31	0.673	9.64	212.0
525.1	18.425	339.5	15.16	0.638	9.67	212.8
648.7	20.227	409.1	15.54	0.665	10.34	227.5
749.8	21.675	469.8	15.64	0.687	10.74	236.2
567.8	17.906	320.6	17.36	0.630	10.93	240.5
724.8	20.944	438.6	16.19	0.676	10.95	240.8
596.0	18.317	335.5	17.41	0.636	11.08	243.7
412.8	14.362	206.3	19.61	0.570	11.19	246.1
781.2	21.257	451.8	16.94	0.681	11.53	253.7
735.3	19.149	366.7	19.65	0.649	12.76	280.7
764.3	19.33	373.7	20.05	0.652	13.07	287.5
Promedios					9.5	208.5
Desvío estándar					2.0	44.2
Coefficiente de variación (%)					21.1	21.1

PIEDRA PARTIDA CUARCÍTICA (q)

P (kg)	De (mm)	De² (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)	f'c (MPa)
189.5	17.5	306.7	6.06	0.624	3.78	83.1
241.8	20.2	409.1	5.79	0.665	3.85	84.8
223.8	18.7	350.2	6.26	0.643	4.02	88.5
261.5	20.7	428.0	5.99	0.672	4.02	88.5
232.2	18.9	357.6	6.36	0.646	4.11	90.4
255.6	17.7	314.4	7.97	0.627	5.00	109.9
236.6	16.8	281.8	8.23	0.612	5.04	110.8
243.0	17.1	291.2	8.18	0.616	5.04	110.9
262.8	17.7	314.9	8.18	0.627	5.13	112.9
261.1	17.6	308.4	8.30	0.624	5.18	114.0
245.5	16.8	282.1	8.53	0.612	5.22	114.8
314.3	18.5	342.9	8.98	0.640	5.74	126.4
330.8	18.7	350.3	9.25	0.643	5.95	130.8
377.4	19.6	385.8	9.59	0.657	6.30	138.5
292.1	15.2	232.1	12.33	0.586	7.22	158.9
526.7	21.6	466.3	11.07	0.685	7.59	166.9
Promedios					5.2	114.4
Desvío estándar					1.15	25.2
Coefficiente de variación (%)					22.1	22.1

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN a/c = 0.30 (Ra)

P (kg)	De (mm)	De² (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)	f'c (MPa)
57.2	20.624	425.4	1.32	0.671	0.88	19.5
50.3	18.616	346.6	1.42	0.641	0.91	20.1
61.2	20.6	424.4	1.41	0.67	0.95	20.86
48.7	17.568	308.6	1.55	0.625	0.97	21.2
47.9	16.737	280.1	1.68	0.611	1.02	22.5
49.1	14.82	219.6	2.19	0.58	1.27	27.89
86.6	18.454	340.6	2.49	0.639	1.59	35.0
79.3	16.551	273.9	2.84	0.608	1.72	37.9
101.1	18.831	354.6	2.79	0.644	1.80	39.6
136.9	22.226	494.0	2.72	0.694	1.89	41.5
94.2	16.178	261.7	3.53	0.602	2.12	46.7
92.2	15.57	242.4	3.73	0.592	2.20	48.5
78.5	13.88	192.6	3.99	0.562	2.24	49.4
162.7	21.461	460.6	3.46	0.683	2.37	52.1
187.3	22.89	524.0	3.50	0.704	2.46	54.2
124.8	16.756	280.7	4.36	0.61	2.66	58.6
188.5	21.254	451.7	4.09	0.680	2.78	61.2
216.6	23.125	534.8	3.97	0.707	2.81	61.7
191.3	21.046	442.9	4.23	0.68	2.87	63.08
160.7	18.071	326.5	4.82	0.633	3.05	67.1
175.6	17.912	320.9	5.36	0.630	3.38	74.3
209.0	18.689	349.3	5.86	0.642	3.77	82.9
154.2	15.264	233	6.49	0.59	3.8	83.66
172.8	16.181	261.8	6.47	0.6	3.89	85.65
193.7	16.257	264.3	7.18	0.603	4.33	95.3
282.7	19.919	396.8	6.98	0.661	4.61	101.5
Promedios					2.40	52.77
Desvío estándar					1.1	24.26
Coefficiente de variación (%)					45.8	45.8

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN a/c = 0.50 (Rb)

P (kg)	De (mm)	De² (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)	f'c (MPa)
51.9	21.32	454.5	1.12	0.681	0.76	16.8
40.3	17.037	290.3	1.36	0.616	0.84	18.4
41.9	15.611	243.7	1.68	0.592	1.00	21.95
50.3	15.549	241.8	2.04	0.591	1.21	26.52
83.0	19.112	365.3	2.23	0.649	1.44	31.8
83.8	18.881	356.5	2.30	0.645	1.49	32.7
126.9	22.964	527.4	2.36	0.705	1.66	36.6
103.1	20.014	400.6	2.52	0.662	1.67	36.8
95.0	18.284	334.3	2.78	0.636	1.77	39.0
118.8	19.649	386.1	3.02	0.657	1.98	43.6
107.9	18.412	339.0	3.12	0.638	1.99	43.8
192.1	25.333	641.8	2.93	0.736	2.16	47.5
138.1	20.29	411.7	3.29	0.666	2.19	48.2
84.2	14.337	205.5	4.01	0.570	2.29	50.3
173.6	21.155	447.5	3.80	0.679	2.58	56.8
145.4	18.67	348.6	4.09	0.642	2.62	57.7
157.1	19.191	368.3	4.18	0.650	2.72	59.8
143.4	18.072	326.6	4.30	0.633	2.72	59.9
182.8	19.593	383.9	4.67	0.656	3.06	67.35
169.1	17.344	300.8	5.51	0.621	3.42	75.26
141.8	15.327	234.9	5.92	0.587	3.47	76.4
181.6	17.898	320.3	5.56	0.630	3.5	76.98
156.7	16.246	263.9	5.82	0.603	3.51	77.2
187.7	17.353	301.1	6.11	0.621	3.79	83.5
189.7	17.16	294.5	6.31	0.618	3.9	85.8
215.4	17.201	295.9	7.13	0.619	4.41	97.1
224.3	16.41	269.3	8.16	0.606	4.94	108.8
Promedios					2.49	52.24
Desvío estándar					0.91	20.02
Coefficiente de variación (%)					36.5	38.6

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN LOSAS DE PAVIMENTO (Rv)

P (kg)	De (mm)	De² (mm)	Is (MPa)	F	Is50 (MPa)	f'c (MPa)
120.3	21.2	451.2	2.61	0.680	1.78	39.1
139.2	20.9	436.5	3.13	0.675	2.11	46.4
115.6	18.5	342.8	3.30	0.639	2.11	46.5
142.5	20.6	423.8	3.29	0.671	2.21	48.6
102.6	16.1	258.3	3.89	0.600	2.34	51.4
132.4	18.8	352.3	3.68	0.643	2.37	52.1
196.0	24.0	573.6	3.35	0.718	2.40	52.9
181.1	22.3	495.8	3.58	0.695	2.49	54.7
222.5	24.0	576.0	3.79	0.719	2.72	59.9
114.7	15.2	231.3	4.86	0.585	2.85	62.6
193.2	19.7	388.0	4.88	0.658	3.21	70.6
174.2	17.9	319.1	5.35	0.629	3.37	74.1
247.5	21.6	468.4	5.18	0.686	3.55	78.2
172.3	16.7	279.3	6.05	0.611	3.69	81.2
193.6	18.0	324.2	5.85	0.632	3.70	81.3
Promedios					2.7	60.0
Desvío estándar					0.63	13.9
Coefficiente de variación (%)					23.3	23.3

Anexo 2-A

MÓDULO DE ROTURA DEL AGREGADO

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN DESCONOCIDO (Rd)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
22.5	28.2	64.03	3.32
25.6	28.0	73.85	3.41
24.8	27.0	71.25	3.65
26.3	25.5	69.40	3.76
27.4	27.8	86.44	3.78
26.8	28.0	86.39	3.81
27.0	26.3	80.19	3.98
25.6	28.7	90.66	3.98
26.4	26.7	81.61	4.02
25.2	26.3	77.15	4.10
28.5	27.5	96.38	4.14
27.1	26.9	90.52	4.28
23.4	27.0	79.09	4.30
28.0	25.4	86.44	4.43
27.0	27.3	98.59	4.54
27.0	22.7	68.32	4.55
26.7	27.3	98.05	4.57
27.0	27.2	99.80	4.63
25.3	27.0	92.24	4.63
26.2	27.0	99.06	4.81
26.7	25.0	86.71	4.81
25.0	26.2	89.99	4.86
26.3	24.3	82.36	4.91
25.8	25.0	85.61	4.92
27.4	25.5	94.68	4.92
27.5	22.0	71.06	4.95
25.6	25.5	90.63	5.04
29.0	28.0	124.90	5.09
29.0	25.2	102.20	5.14
26.7	25.5	97.58	5.21
25.3	26.3	100.00	5.29
25.8	24.7	91.17	5.37
27.8	23.7	91.09	5.40
28.0	27.3	121.80	5.41
26.8	25.7	103.80	5.43

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN DESCONOCIDO (Rd) (continuación)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
26.5	25.8	103.80	5.45
25.6	27.0	110.50	5.49
27.3	28.5	132.60	5.54
26.9	27.0	119.10	5.63
23.4	27.3	107.40	5.71
24.3	27.6	115.70	5.79
22.8	24.9	88.64	5.81
23.5	25.7	97.72	5.83
23.0	25.0	91.76	5.91
26.5	25.9	119.5	6.23
Promedios		49.15	4.82
Desvío estándar		7.50	0.74
Coefficiente de variación (%)		15.3	15.3

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN a/c = 0.30 (Ra)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
26.00	25.58	108.00	5.88
26.75	25.53	114.70	6.10
24.58	25.85	112.70	6.36
24.45	25.55	112.20	6.51
22.75	26.53	114.20	6.61
26.23	25.80	125.20	6.64
22.90	26.90	123.50	6.90
24.68	26.55	132.10	7.04
24.25	24.40	111.00	7.12
22.08	25.28	116.50	7.65
25.13	25.75	139.50	7.76
25.25	26.18	153.80	8.24
22.40	24.05	119.60	8.55
22.50	24.13	124.80	8.83
24.25	24.03	136.80	9.05
Promedios		74.00	7.28
Desvío estándar		8.93	0.88
Coefficiente de variación (%)		12.1	12.1

AGREGADO RECICLADO HORMIGÓN a/c = 0.50 (Rb)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
21.88	25.25	80.30	5.33
21.93	23.08	68.10	5.40
23.68	24.53	83.10	5.41
22.35	24.85	80.60	5.41
24.80	24.40	88.00	5.52
23.95	25.60	94.40	5.57
23.63	22.83	75.80	5.71
21.90	24.20	80.00	5.78
23.15	25.20	91.80	5.79
24.70	24.73	96.80	5.94
23.13	24.83	92.80	6.03
24.65	24.30	95.80	6.10
24.73	26.58	119.10	6.32
23.50	24.28	95.30	6.38
24.65	26.45	119.00	6.39
23.45	26.23	111.50	6.41
23.43	26.20	115.50	6.65
23.23	28.88	157.00	7.51
24.40	24.75	124.80	7.74
Promedios		61.94	6.07
Desvío estándar		6.92	0.68
Coefficiente de variación (%)		11.2	11.2

MORTERO RECICLADO a/c = 0.30 (Ma)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
25.13	24.13	125.30	8.10
25.58	24.15	128.50	8.14
25.08	25.60	143.10	8.23
25.40	24.30	132.10	8.32
24.53	25.38	141.20	8.45
25.00	24.75	138.70	8.56
24.60	24.50	136.60	8.74
24.23	25.20	143.40	8.81
25.65	24.88	148.70	8.85
24.20	25.65	149.30	8.86
22.33	26.20	146.10	9.01
25.55	24.78	150.50	9.07
24.45	24.63	142.50	9.08
23.33	25.08	142.40	9.18
24.48	25.13	152.50	9.33
25.13	24.65	152.10	9.42
24.78	25.35	158.90	9.43
Promedios		87.99	8.80
Desvío estándar		4.38	0.44
Coficiente de variación (%)		5.0	5.0

MORTERO RECICLADO a/c = 0.50 (Mb)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MR (MPa)
25.68	25.28	108.90	6.27
25.53	24.80	106.80	6.43
24.85	25.50	113.90	6.66
25.20	25.15	115.00	6.82
25.45	25.43	121.10	6.96
25.25	25.30	120.00	7.02
24.83	25.15	118.00	7.10
24.93	25.70	124.20	7.13
25.13	24.73	117.40	7.22
24.95	25.78	129.50	7.38
25.38	25.00	124.10	7.39
25.55	25.28	127.90	7.41
24.95	25.75	129.90	7.42
25.03	25.55	128.30	7.42
25.00	25.70	130.90	7.49
24.85	24.95	124.40	7.60
25.03	25.53	131.30	7.61
26.13	24.93	130.80	7.62
25.10	25.53	131.90	7.62
25.15	25.70	135.80	7.73
25.78	25.03	135.50	7.93
24.80	25.33	137.10	8.15
24.75	25.45	139.30	8.21
24.13	25.33	137.90	8.42
25.45	25.28	145.90	8.48
Promedios		74.20	7.42
Desvío estándar		5.64	0.56
Coefficiente de variación (%)		7.6	7.6

Anexo 2-B

Módulo de rotura de la matriz

MORTERO a/c = 0.50 (M1)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MMR (MPa)
24.38	25.48	104.40	6.24
25.15	25.33	107.00	6.27
24.73	25.53	108.00	6.34
25.00	25.98	113.60	6.36
25.28	25.15	107.90	6.38
24.45	25.63	109.20	6.43
25.00	25.80	113.80	6.46
25.03	25.33	110.60	6.51
24.23	25.65	110.10	6.53
24.35	25.45	110.60	6.63
25.13	26.20	121.60	6.66
25.13	25.38	114.20	6.67
25.20	24.58	108.90	6.76
25.00	25.05	112.40	6.77
25.20	25.18	114.80	6.79
25.05	25.45	117.00	6.81
25.23	26.18	125.60	6.87
25.28	25.15	116.50	6.89
25.18	25.15	116.10	6.89
25.55	25.23	118.80	6.91
24.50	25.35	117.70	7.06
25.35	25.35	122.30	7.09
23.65	24.73	108.70	7.10
Promedios		66.71	6.67
Desvío estándar		2.66	0.27
Coefficiente de variación (%)		4.0	4.0

MORTERO a/c = 0.35 (M2-1)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MMR (MPa)
25.13	24.13	125.30	8.10
25.58	24.15	128.50	8.14
25.08	25.60	143.10	8.23
25.40	24.30	132.10	8.32
24.53	25.38	141.20	8.45
25.00	24.75	138.70	8.56
24.60	24.50	136.60	8.74
24.23	25.20	143.40	8.81
25.65	24.88	148.70	8.85
24.20	25.65	149.30	8.86
22.33	26.20	146.10	9.01
25.55	24.78	150.50	9.07
24.45	24.63	142.50	9.08
23.33	25.08	142.40	9.18
24.48	25.13	152.50	9.33
25.13	24.65	152.10	9.42
24.78	25.35	158.90	9.43
Promedios		87.99	8.80
Desvío estándar		4.38	0.44
Coefficiente de variación (%)		5.0	5.0

MORTERO a/c = 0.30 (M2-2)

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	MMR (MPa)
25.18	25.05	105.40	6.31
23.85	24.50	115.50	7.62
24.95	25.58	133.60	7.74
25.05	25.78	138.60	7.87
25.05	24.48	125.00	7.87
25.48	25.20	135.20	7.90
25.08	26.38	148.30	8.03
25.73	25.23	139.70	8.07
26.35	25.55	147.10	8.08
25.50	23.35	119.10	8.10
24.98	25.08	135.50	8.15
25.08	25.15	138.10	8.23
25.95	25.35	146.00	8.27
26.05	25.13	146.00	8.39
24.98	24.28	130.90	8.41
25.48	23.10	121.00	8.41
25.18	24.78	137.90	8.43
24.68	25.65	145.80	8.49
25.10	25.30	145.50	8.56
25.88	24.15	137.80	8.63
26.33	25.50	156.50	8.64
25.08	25.18	148.30	8.82
26.30	23.38	134.20	8.83
25.53	25.05	149.90	8.84
Promedios		81.95	8.19
Desvío estándar		5.31	0.53
Coefficiente de variación (%)		6.5	6.5

Anexo 2-C

MÓDULO DE ROTURA DE LA INTERFAZ

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-GRANITO (G) Superficie arenada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
24.63	25.28	23.70	1.42
23.33	24.68	25.02	1.66
23.95	23.85	24.19	1.68
24.58	24.78	28.72	1.80
26.05	22.88	26.23	1.82
25.50	25.33	32.85	1.90
23.38	25.03	29.68	1.92
24.93	25.20	33.73	2.01
26.10	23.70	31.45	2.03
25.08	24.53	34.46	2.16
24.35	24.83	37.11	2.34
21.55	22.10	31.45	2.82
25.00	23.28	42.03	2.93
24.43	24.88	47.52	2.97
25.40	25.33	55.95	3.25
25.25	25.00	56.05	3.36
Promedios		22.54	2.25
Desvío estándar		6.13	0.61
Coefficiente de variación (%)		27.2	27.2

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO DESCONOCIDO (Rd) Superficie cortada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
21.95	27.48	26.64	1.52
23.88	26.73	29.17	1.62
22.88	24.70	23.91	1.62
25.50	24.35	30.27	1.89
26.65	23.90	32.52	2.02
24.35	22.75	27.10	2.03
24.85	23.28	31.11	2.18
25.10	25.05	36.86	2.21
25.18	26.23	41.29	2.25
24.00	27.25	49.10	2.60
23.05	27.13	49.45	2.76
25.53	25.15	48.19	2.82
24.50	25.48	48.97	2.91
25.58	24.30	49.34	3.09
25.90	24.98	56.05	3.28
22.10	27.08	61.13	3.57
Promedios		23.98	2.40
Desvío estándar		6.25	0.62
Coefficiente de variación (%)		26.0	26.0

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO DESCONOCIDO (Rd) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.40	25.55	37.74	2.33
24.53	26.43	48.46	2.67
25.10	26.53	50.71	2.71
24.98	25.75	47.95	2.74
24.68	25.15	46.89	2.84
26.90	24.60	49.02	2.85
24.48	25.55	53.93	3.19
23.05	27.50	60.19	3.26
25.23	24.23	51.49	3.29
25.23	24.83	57.91	3.52
23.10	26.93	65.80	3.71
24.70	26.05	69.64	3.93
24.88	25.73	69.13	3.97
25.75	26.05	74.34	4.02
26.40	24.20	76.05	4.65
22.45	24.98	73.34	4.95
Promedios		34.86	3.49
Desvío estándar		7.11	0.71
Coefficiente de variación (%)		20.4	20.4

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO CONOCIDO (Ra) Superficie cortada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
24.20	22.83	42.00	3.15
24.33	24.85	51.05	3.21
24.00	24.70	50.98	3.29
23.75	23.18	46.26	3.43
25.55	24.68	57.98	3.52
25.40	24.48	57.73	3.59
26.48	25.45	66.49	3.66
24.68	24.23	64.43	4.20
27.08	25.65	83.56	4.43
25.53	24.85	88.37	5.30
22.65	24.20	81.50	5.81
Promedios		39.63	3.96
Desvío estándar		8.86	0.89
Coefficiente de variación (%)		22.4	22.4

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO CONOCIDO (Ra) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
24.63	22.40	44.99	3.44
24.45	24.33	56.91	3.72
25.03	24.75	73.56	4.53
24.53	24.53	72.19	4.62
22.90	27.60	86.58	4.69
23.35	24.30	71.30	4.89
22.45	24.75	74.28	5.10
25.20	26.58	97.32	5.17
24.63	22.38	71.65	5.49
26.28	24.58	94.36	5.62
25.38	24.70	97.65	5.96
24.73	26.10	111.23	6.24
23.85	24.20	95.32	6.45
Promedios		50.71	5.07
Desvío estándar		8.99	0.90
Coefficiente de variación (%)		17.7	17.7

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO CONOCIDO (Rb) Superficie cortada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
22.05	24.85	34.60	2.40
25.55	25.50	44.25	2.52
25.70	23.73	41.03	2.68
24.15	24.73	42.68	2.73
24.83	24.73	46.82	2.92
23.20	24.83	45.48	3.01
22.95	24.08	43.07	3.06
25.20	24.88	52.83	3.20
23.15	24.75	51.84	3.45
22.93	23.13	46.86	3.61
24.28	23.90	53.96	3.68
25.55	24.33	63.09	3.94
24.15	24.75	72.05	4.60
26.53	24.58	79.27	4.68
Promedios		33.20	3.32
Desvío estándar		7.17	0.72
Coefficiente de variación (%)		21.6	21.6

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-RECICLADO CONOCIDO (Rb) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
24.53	24.30	52.74	3.44
23.50	25.93	62.33	3.73
24.15	24.15	56.02	3.76
24.10	25.15	63.32	3.93
24.33	24.85	63.97	4.02
24.73	25.30	73.79	4.41
22.73	25.33	72.83	4.72
23.43	26.08	88.34	5.24
25.45	24.65	88.02	5.38
23.25	25.33	87.48	5.54
21.88	24.15	76.53	5.67
23.50	24.88	88.02	5.72
Promedios		46.30	4.63
Desvío estándar		8.50	0.85
Coefficiente de variación (%)		18.4	18.4

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-MORTERO RECICLADO a/c = 0.30 (Ma) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.48	25.10	37.64	2.41
25.73	25.88	44.59	2.45
24.88	25.73	43.42	2.49
25.55	24.68	41.50	2.52
25.18	24.88	42.86	2.60
24.18	24.88	42.58	2.69
24.35	25.30	45.64	2.77
23.80	25.88	48.08	2.85
26.25	25.60	58.36	3.21
25.33	24.93	53.40	3.21
25.53	24.98	55.09	3.27
25.75	24.53	53.96	3.29
25.20	25.13	58.09	3.45
24.88	25.53	60.11	3.50
24.65	25.25	59.22	3.56
25.13	24.98	61.83	3.73
25.23	25.70	66.01	3.74
Promedios		30.434	3.04
Desvío estándar		4.71	0.47
Coefficiente de variación (%)		15.5	15.5

MORTERO a/c = 0.50 (M1)-MORTERO RECICLADO a/c = 0.50 (Mb) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
50.70	25.30	81.45	2.37
25.13	24.98	44.67	2.69
25.30	25.33	55.25	3.22
25.88	24.73	55.57	3.32
24.95	25.38	60.16	3.54
25.33	25.13	60.38	3.57
25.03	25.38	61.72	3.62
24.90	25.20	60.99	3.64
25.18	25.10	64.91	3.87
24.98	25.73	68.34	3.91
24.83	25.98	69.88	3.94
25.83	25.33	69.18	3.95
25.33	25.45	70.71	4.07
24.60	25.33	68.08	4.08
25.53	25.38	71.01	4.08
25.55	25.43	73.37	4.20
25.73	25.60	74.98	4.20
25.30	24.60	68.40	4.22
25.00	25.40	72.64	4.26
25.65	25.33	75.84	4.36
25.40	25.25	74.90	4.37
25.08	25.15	74.82	4.46
26.03	25.45	83.30	4.67
25.28	25.25	83.46	4.89
25.63	24.48	79.62	4.90
Promedios		39.36	3.94
Desvío estándar		6.05	0.60
Coefficiente de variación (%)		15.4	15.4

MORTERO a/c = 0.35 (M2-1)-GRANITO (G) Superficie arenada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.53	22.95	37.85	2.89
23.90	24.23	43.41	2.92
25.05	24.10	47.07	3.06
23.93	25.15	50.32	3.14
25.40	24.65	53.81	3.29
23.33	24.33	49.64	3.40
23.65	25.15	55.98	3.54
24.68	23.40	54.71	3.83
25.23	24.23	67.33	4.30
23.70	21.60	50.50	4.32
23.68	23.60	60.30	4.32
22.93	25.15	68.46	4.46
23.08	24.80	75.09	5.00
24.45	23.78	76.56	5.23
22.80	22.68	65.56	5.28
25.45	23.35	78.85	5.37
23.43	23.18	81.70	6.14
20.93	24.60	83.32	6.22
24.23	22.28	79.84	6.28
Promedios		43.68	4.37
Desvío estándar		11.49	1.15
Coefficiente de variación (%)		26.3	26.3

MORTERO a/c = 0.35 (M2-1)-RECICLADO DESCONOCIDO (Rd) Superficie fracturada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.20	24.60	74.25	5.00
25.25	24.75	82.89	5.06
22.63	24.15	71.73	5.14
27.30	24.73	92.62	5.24
23.83	25.03	90.17	5.71
22.25	24.95	84.75	5.78
23.45	24.78	90.20	5.92
22.53	22.83	81.15	6.53
24.58	25.43	110.95	6.60
22.55	24.18	94.66	6.79
Promedios		57.78	5.78
Desvío estándar		6.76	0.68
Coefficiente de variación (%)		11.7	11.7

MORTERO a/c = 0.30 (M2-2)-GRANITO (G) Superficie arenada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
25.35	25.28	37.58	2.19
25.38	25.25	37.93	2.22
26.13	23.55	38.30	2.50
25.00	25.43	45.18	2.64
23.00	24.28	40.43	2.82
25.08	25.23	49.02	2.90
25.23	25.20	65.18	3.85
24.23	22.83	52.32	3.92
24.35	25.75	69.26	4.05
23.63	24.90	64.08	4.13
24.60	25.03	68.91	4.23
25.48	23.60	64.21	4.28
25.40	23.08	63.22	4.42
24.53	23.60	66.36	4.59
25.20	25.40	89.53	5.20
24.30	25.15	85.21	5.24
Promedios		36.99	3.70
Desvío estándar		10.13	1.01
Coefficiente de variación (%)		27.4	27.4

MORTERO a/c = 0.30 (M2-2)-Hº RECICLADO CONOCIDO (Ra) Superficie cortada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.98	24.20	48.24	3.25
24.45	21.98	42.98	3.44
24.70	24.83	57.07	3.54
23.70	24.00	52.51	3.63
26.20	24.75	65.99	3.89
22.63	22.75	48.24	3.89
23.48	22.25	48.05	3.91
22.75	22.58	47.95	3.91
22.98	26.53	68.48	4.00
22.75	23.30	52.56	4.02
25.70	25.03	70.20	4.12
22.95	25.28	68.40	4.41
23.30	24.03	63.19	4.44
23.60	24.33	68.81	4.66
23.65	25.53	76.75	4.71
21.90	24.48	75.11	5.41
25.20	24.80	93.34	5.69
22.85	23.83	81.69	5.95
21.80	23.03	81.34	6.65
Promedios		43.96	4.40
Desvío estándar		9.21	0.92
Coefficiente de variación (%)		21.0	21.0

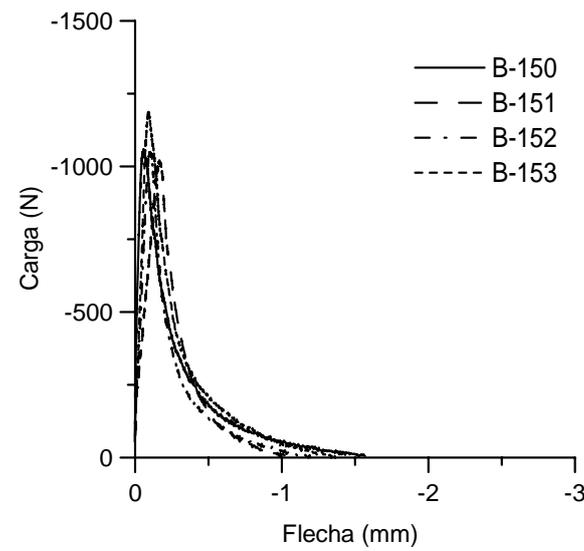
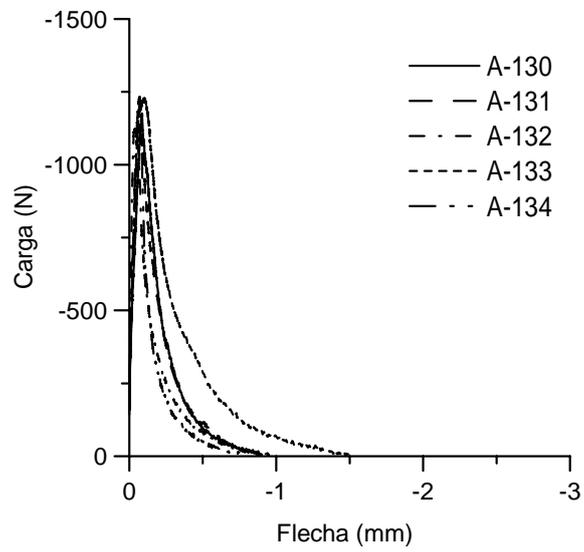
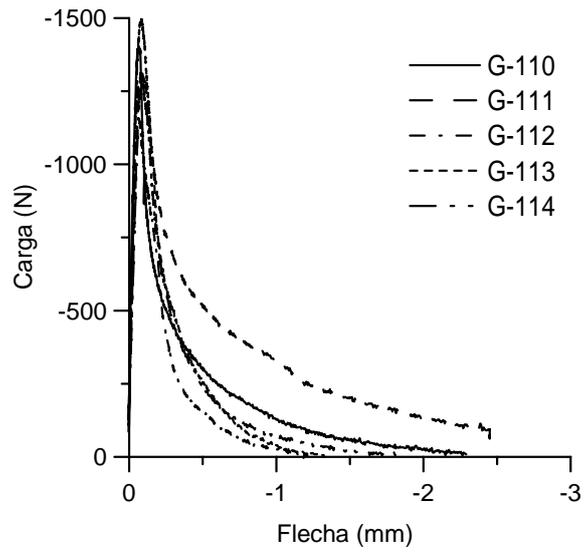
MORTERO a/c = 0.30 (M2-2)-Hº RECICLADO CONOCIDO (Rb) Superficie cortada

Ancho (mm)	Altura (mm)	P (kg)	IMR (MPa)
23.43	23.23	36.77	2.75
24.25	23.95	41.59	2.83
23.63	24.05	42.30	2.93
24.58	24.73	51.09	3.21
23.23	25.70	55.84	3.44
22.95	23.28	46.63	3.54
22.80	24.88	53.18	3.56
24.68	24.88	59.60	3.69
24.85	23.93	57.34	3.81
22.73	23.10	49.42	3.85
22.93	24.80	58.91	3.95
23.80	24.10	60.03	4.10
24.60	24.98	67.52	4.16
23.53	23.20	59.71	4.46
25.73	23.73	69.22	4.52
23.28	25.05	71.82	4.65
23.18	24.63	69.97	4.71
24.60	23.75	82.47	5.62
21.93	24.15	77.98	5.76
Promedios		39.75	3.98
Desvío estándar		8.41	0.84
Coefficiente de variación (%)		21.2	21.2

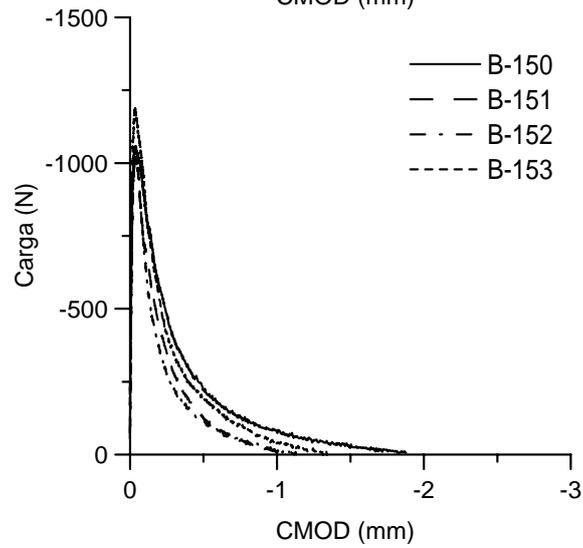
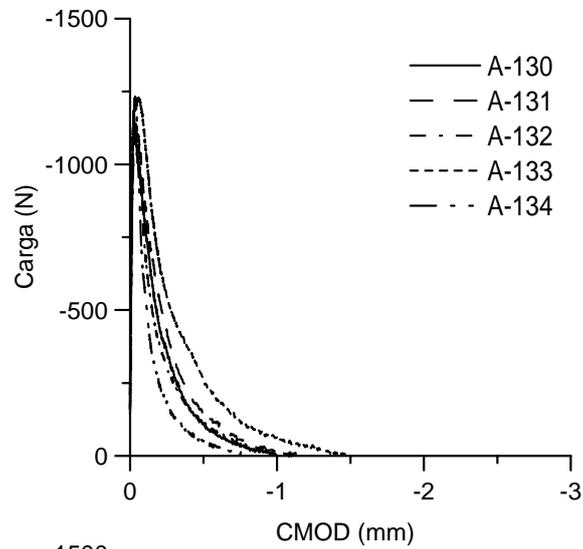
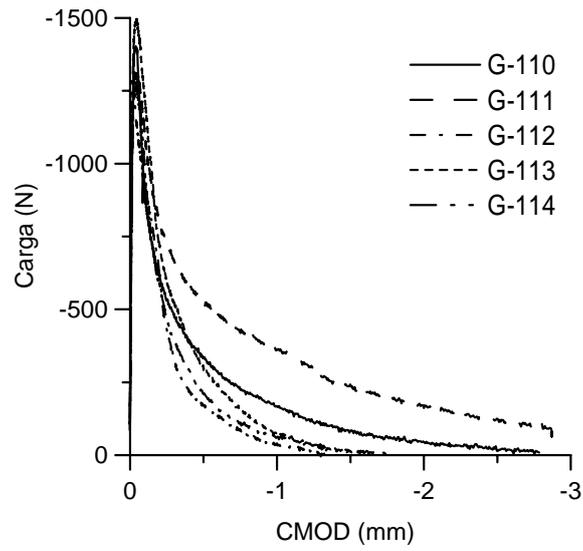
Anexo 3

CURVAS CARGA-FLECHA Y CARGA-CMOD

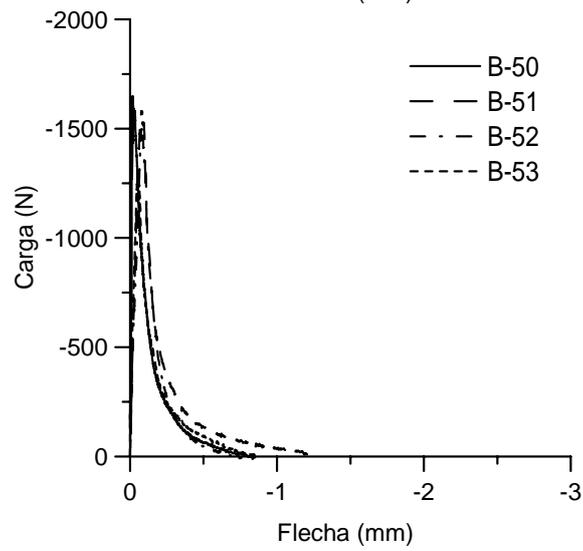
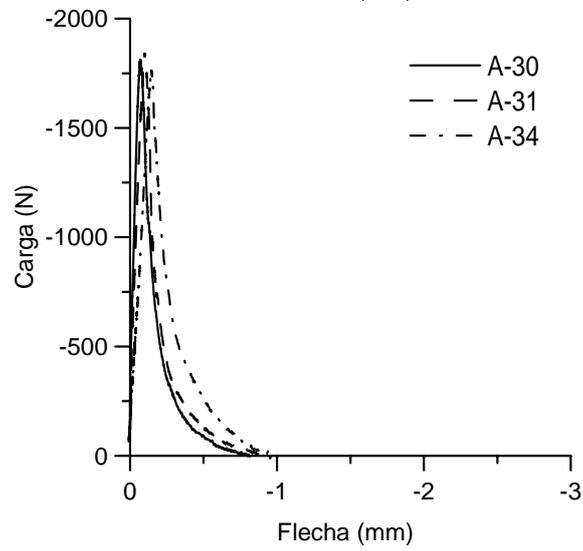
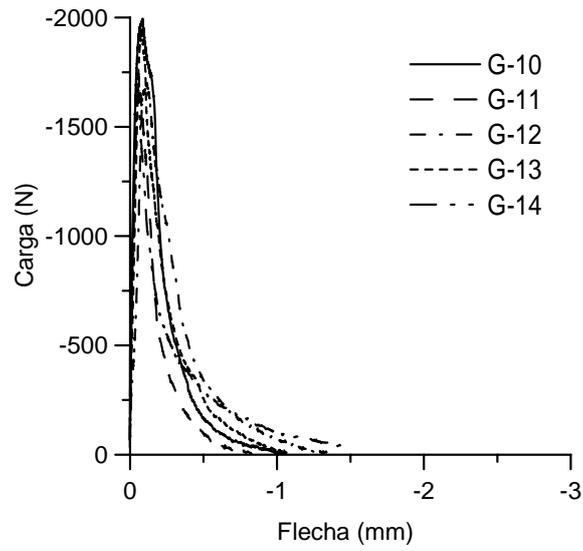
CURVAS CARGA-FLECHA H 18



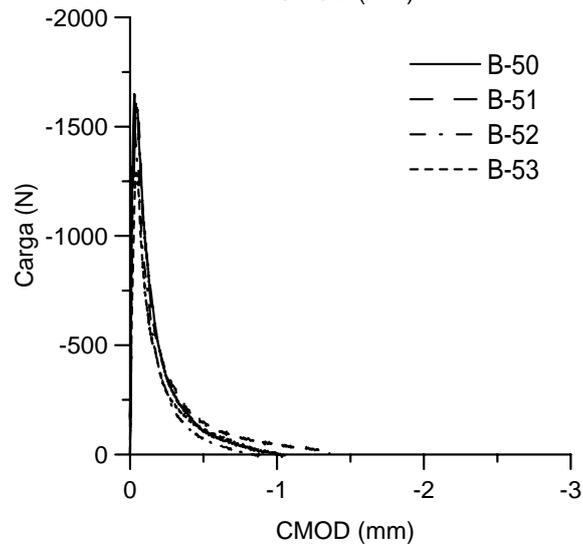
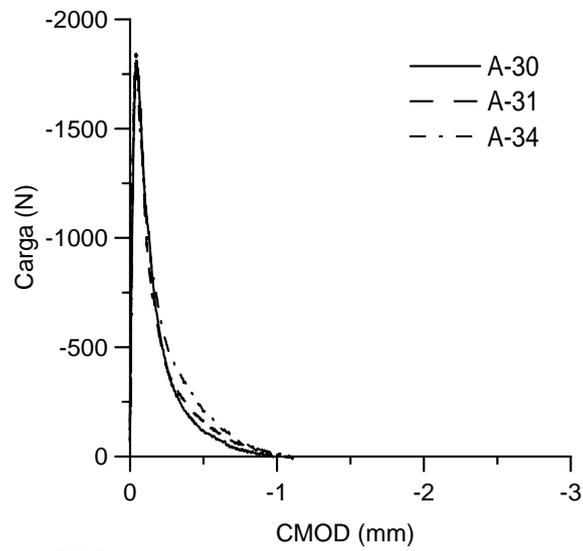
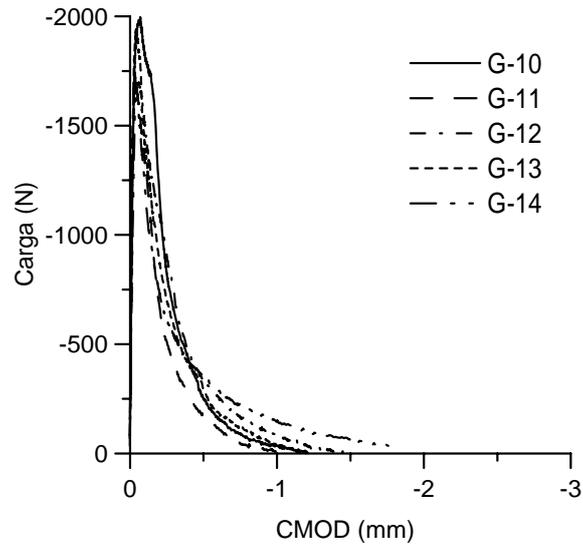
CURVAS CARGA-APERTURA DE FISURA H 18



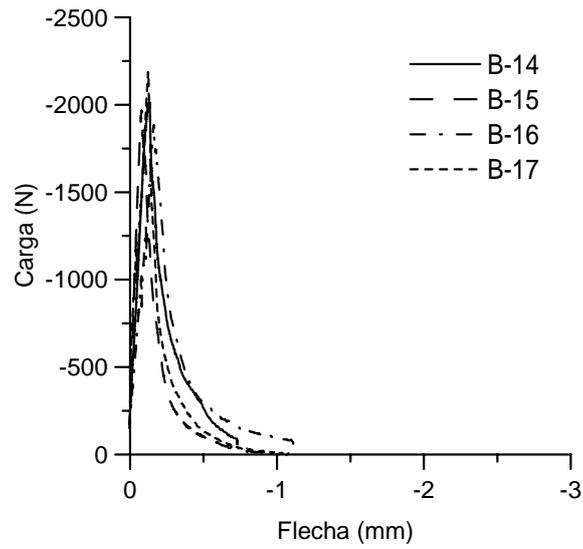
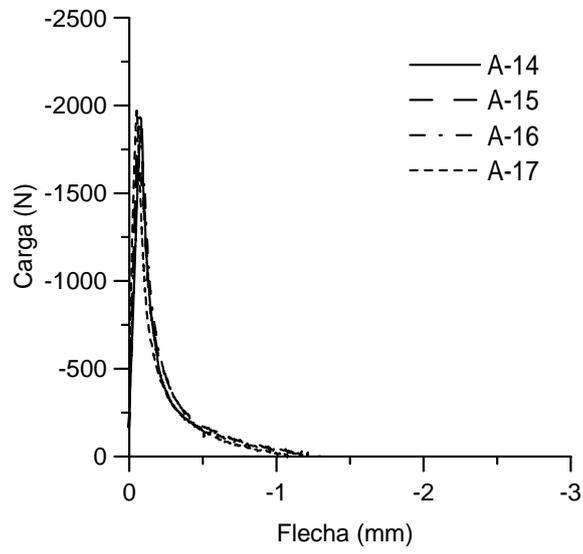
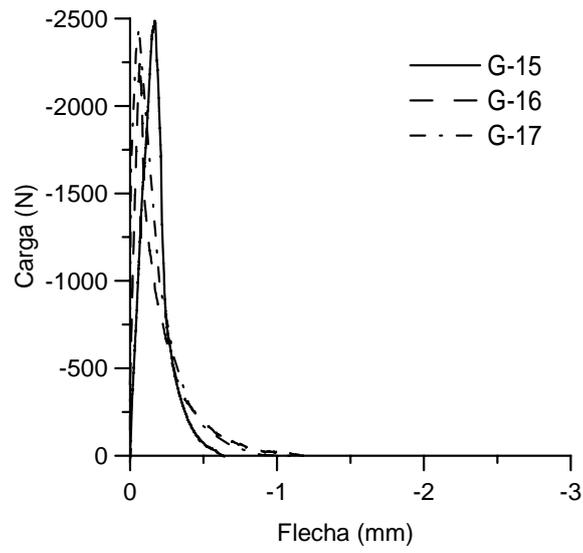
CURVAS CARGA-FLECHA H 37



CURVAS CARGA-APERTURA DE FISURA H 37



CURVAS CARGA-FLECHA H 48



CURVAS CARGA-APERTURA DE FISURA H 48

