

HORMIGONES RECICLADOS: CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

Claudio Javier Zega

Director: Angel A. Di Maio

Tesis presentada para el grado de: MAGISTER

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, U.N.C.P.B.A.

Septiembre, 2008.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Di Maio por la colaboración brindada durante la realización de las investigaciones, y por su dedicación en la dirección del presente trabajo.

Al director del Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), Ing. Traversa, y a las autoridades de la Facultad de Ingeniería de Olavarría (U.N.C.P.B.A.) por posibilitar la realización del Magíster en Tecnología y Construcciones de Hormigón.

Al personal del Area Tecnología del hormigón del LEMIT, por la colaboración brindada durante la realización de las experiencias, fundamentalmente en la trituración de los hormigones que dieron lugar a los agregados reciclados y durante la elaboración de los distintos hormigones.

Y muy especialmente a mi esposa Luciana, cuya comprensión, compañía y apoyo incondicionales facilitaron la concreción de este proyecto.

Hormigones Reciclados: Caracterización de los agregados gruesos reciclados

Claudio Javier Zega

Resumen

El reciclado de materiales de desecho para la elaboración de nuevos materiales y/o productos ha cobrado un gran interés durante las últimas décadas. La industria de la construcción se ha sumado a esta tendencia mundial reutilizando algunos de los desechos de la construcción y demolición como agregados para la elaboración de nuevos hormigones, reemplazando total o parcialmente a los agregados naturales.

Esta tendencia se vio promovida principalmente por dos cuestiones, las ambientales, originadas en los grandes volúmenes de desechos generados luego de la Segunda Guerra Mundial a causa de la reconstrucción de los centros urbanos, los que eran depositados en cualquier sitio, y las debidas a los inconvenientes que muchas veces existen para la obtención de agregados naturales adecuados para la elaboración de hormigones, ya sea porque la calidad de los mismos no resulta adecuada o bien por las grandes distancias a que se sitúan las canteras que poseen agregados aptos para su uso, motivo que incrementa considerablemente el costo de los mismos.

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo estudiar las diferentes propiedades que presentan los agregados gruesos reciclados obtenidos de la trituración de hormigones convencionales de desecho de características tecnológicas desconocidas. Más específicamente, se estudiaron diferentes muestras de agregados gruesos reciclados que fueron extraídas periódicamente de un acopio de hormigones triturados durante un período de tiempo, simulando lo que sería un centro de reciclaje. Además, se estudiaron los agregados gruesos reciclados que surgieron de la realización de ciclos de reciclado a partir de la elaboración y posterior trituración de un hormigón convencional de características totalmente conocidas.

En ambos casos, se evaluaron diferentes propiedades físico-mecánicas de los agregados gruesos reciclados comparativamente con la de los agregados gruesos naturales, para lo cual cada ensayo se realizó siguiendo los lineamientos indicados en las normas vigentes para los agregados gruesos naturales.

Además, con cada uno de los agregados gruesos reciclados estudiados se elaboraron hormigones de distintas razones agua/cemento utilizando dichos agregados como reemplazo del 75 % en volumen de los agregados gruesos naturales. Se evaluaron las características de las mezclas recicladas en estado fresco y su comportamiento resistente en estado endurecido. Asimismo, se determinaron diferentes parámetros físicos que permiten obtener un mayor conocimiento sobre la porosidad de los hormigones reciclados, para lo cual se evaluó la absorción de agua, densidad, velocidad del pulso ultrasónico y frecuencia de resonancia. Las propiedades evaluadas sobre los hormigones reciclados fueron comparadas con las determinadas sobre hormigones convencionales de similares características.

De los resultados obtenidos surge que la presencia del mortero proveniente del hormigón original, como parte constituyente de los agregados gruesos reciclados, modifica las propiedades de los mismos con relación a la de los agregados naturales. Debido a este hecho se produce una disminución de la calidad de los agregados gruesos reciclados, ocasionando fundamentalmente un incremento en la capacidad de absorción de agua y desgaste “Los Angeles”. Respecto al comportamiento resistente de los hormigones elaborados con los agregados gruesos reciclados, se observa que presentan un nivel de resistencia similar al de los convencionales. Sin embargo, el módulo de elasticidad estático disminuye como consecuencia de la mayor deformabilidad que poseen los hormigones reciclados, debido fundamentalmente a las características propias de los agregados reciclados.

Recycled Concretes: Characterization of recycled coarse aggregates

Claudio Javier Zega

Abstract

The use of waste materials in the elaboration of new materials and products has been increased during the last decades. The construction industry, in accordance with this world tendency, reuses some construction and demolition waste (C&DW) as aggregate to made new concretes, replacing the natural aggregates in a total or partial way.

This tendency has been promoted by two reasons: one environmental, due to the high volume of waste generated by the reconstruction of urban centres after the Second World War, and deposited at different sites; and those due to the difficulties to obtain adequate natural aggregates for concretes, because their inadequate quality or because the big distances from the source of aggregates to the sites where they are used, which increase considerably their costs.

The aim of the present thesis work is to study different properties of recycled coarse aggregates obtained from crashing of waste conventional concretes with unknown technological characteristics. More specifically, different recycled coarse aggregates samples periodically extracted from crushed concretes storing during a period time, were studied. This intended to simulate the recycling plant mechanism. Besides, recycled coarse aggregates obtained from recycling cycles were studied. The former aggregates were obtained by crushing a conventional concrete with totally known characteristics.

In both cases, different physical-mechanical properties of recycled coarse aggregates were comparatively evaluated with those corresponding to the natural coarse aggregates. The tests were carried out according to the guidelines indicated in the existing standards for natural coarse aggregate.

Besides, recycled concretes with different water/cement ratio were made using each one of the recycled coarse aggregates studied, by replacing the 75 % by volume of natural coarse aggregates. The recycled mixes properties at fresh state and their strength behaviour at hardened state were evaluated. Also, different physical parameters which permit to obtain an increased knowledge about the recycled concrete porosity were

determined. The water absorption, density, ultrasonic pulse velocity and resonance frequency were determined. The recycled concrete properties were compared with those corresponding to the conventional concretes with similar characteristics.

The results obtained show that the presence of mortar from original concrete, as a constituent of the recycled coarse aggregates, modifies their properties respect to natural coarse aggregates. Due to this fact, the quality of recycled coarse aggregates decreases, producing higher water absorption and “Los Angeles” abrasion. Recycled concretes present a resistant level similar to that of conventional concretes. However, the static modulus of elasticity decreases respect to that of conventional concrete as a result of the higher deformability of recycled concretes due to the own characteristics of recycled aggregates.

INDICE

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iv
Indice	vi
Indice de Figuras	ix
Indice de Tablas	xi
Nomenclatura	xii

CAPITULO 1 – INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION	1
1.2 JUSTIFICACION	4
1.3 OBJETIVOS	5

CAPITULO 2 – REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUCCION	7
2.2 AGREGADOS RECICLADOS	
2.2.1 Generación	7
2.2.2 Aspecto visual.....	11
2.2.3 Distribución granulométrica	11
2.2.4 Densidad.....	13
2.2.5 Absorción de agua.....	16
2.2.6 Resistencia al desgaste con la máquina “Los Angeles”	19
2.2.7 Porosidad.....	20
2.2.8 Contenido de mortero adherido a los agregados	21
2.2.9 Indices de lajas y elongación.....	21
2.2.10 Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	21
2.2.11 Contenido de material fino.....	22
2.2.12 Contenido de cloruros y sulfatos	22
2.3 HORMIGONES RECICLADOS	
2.3.1 Estado fresco.....	23
2.3.1.1 Asentamiento.....	23
2.3.1.2 Peso por unidad de volumen (PUV).....	26
2.3.1.3 Aire naturalmente incorporado	26
2.3.2 Estado endurecido	26
2.3.2.1 Resistencia a compresión	27
2.3.2.2 Resistencia a tracción	31
2.3.2.3 Módulo de rotura	32
2.3.2.4 Módulo de elasticidad estático	32

CAPITULO 3 – NORMAS Y RECOMENDACIONES

3.1	INTRODUCCION	34
3.2	DEFINICIONES.....	35
3.3	NORMAS Y/O REGLAMENTOS A UTILIZAR	35
3.3.1	Aspectos relativos al modo en que las recomendaciones tratan el tema	36
3.4	ANALISIS Y DISCUSION.....	37
3.4.1	Requerimientos para los agregados reciclados	37
3.4.2	Requerimientos para los hormigones reciclados	42

CAPITULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1	INTRODUCCION	49
4.2	Primera Etapa: AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS	50
4.3	Segunda Etapa: HORMIGONES RECICLADOS.....	53

CAPITULO 5 – Primera Etapa: AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

5.1	INTRODUCCION	55
5.2	GRANULOMETRIA / MODULO DE FINURA	55
5.3	DENSIDAD.....	59
5.4	ABSORCION DE AGUA	60
5.5	RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA “LOS ANGELES”	63
5.6	MATERIAL FINO QUE PASA POR EL TAMIZ IRAM 75 μm (Nº 200)	65
5.7	INDICES DE LAJAS Y ELONGACION	66
5.8	ENSAYO DE DURABILIDAD POR ATAQUE CON SULFATO DE SODIO.....	67
5.9	CONSIDERACION PARA LA EVALUACION Y EMPLEO DE LOS AGR	68

CAPITULO 6 – Segunda Etapa: HORMIGONES RECICLADOS

6.1	INTRODUCCION	69
6.2	ESTADO FRESCO	72
6.3	ESTADO ENDURECIDO	76
6.3.1	Absorción, densidad y porosidad.....	77
6.3.2	Resistencia a compresión.....	81
6.3.3	Módulo de elasticidad estático.....	87
6.3.4	Velocidad del pulso ultrasónico	89
6.3.5	Módulo de elasticidad dinámico.....	92
6.3.6	Resistencia al quebramiento - Presión Break-Off	95

CAPITULO 7 – CONSIDERACIONES FINALES

7.1	CONCLUSIONES	98
7.2	ESTUDIOS FUTUROS	101

CAPITULO 8 – REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

8.1 BIBLIOGRAFIA	103
------------------------	-----

Anexo I – Resultados obtenidos sobre los Agregados Gruesos Reciclados.....	I
--	---

Anexo II – Resultados obtenidos sobre los Hormigones Reciclados.....	III
--	-----

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de flujo de una planta con sistema abierto para la producción de agregados reciclados	8
Figura 2.2 – Diagrama de flujo de una planta con sistema cerrado para la producción de agregados reciclados	9
Figura 2.3 – Trituradora de mandíbulas.....	9
Figura 2.4 – Trituradora de conos.....	10
Figura 2.5 – Trituradora de impacto.....	10
Figura 2.6 – Características de los agregados gruesos reciclados	11
Figura 2.7 – Distribución granulométrica del agregado grueso reciclado.....	12
Figura 2.8 – Granulometría de los AR en función de la edad de trituración.....	12
Figura 2.9 – Granulometría de los AGR y AFR.....	13
Figura 2.10 – Variación de la resistencia a compresión con la razón a/c para los hormigones reciclados y convencionales.....	29
Figura 2.11 – Resistencia a compresión del hormigón reciclado en función de la resistencia del hormigón original	29
Figura 3.1 – Dosis de superplastificante en función del extendido.....	44
Figura 4.1 – Procedimiento de obtención de los sucesivos agregados gruesos reciclados	51
Figura 4.2 – Trituradora de mandíbulas.....	51
Figura 4.3 – Acopio de agregados reciclados de la Serie A	52
Figura 4.4 – Muestra de AGR estudiado.....	53
Figura 5.1 – Curvas granulométricas de los AGR de la Serie A.....	56
Figura 5.2 – Límites granulométricos de los AGR de la Serie A y los establecidos por el CIRSOC 201 para agregados gruesos naturales.....	57
Figura 5.3 – Variación del módulo de finura de los AGR de la Serie A	58
Figura 5.4 – Granulometría de los AGR de la Serie B.....	58
Figura 5.5 – Variación de la densidad de los AGR de la Serie A	59
Figura 5.6 – Densidad de los AGR obtenidos de la Serie B	60
Figura 5.7 – Variación de la absorción de agua de los AGR de la Serie A	61
Figura 5.8 – Relación entre la absorción de agua y la densidad de los AGR	62
Figura 5.9 – Absorción de agua de los AGR de la Serie B.....	62
Figura 5.10 – Variación de la pérdida de peso por abrasión en el ensayo de desgaste “Los Angeles” de los AGR de la Serie A	64
Figura 5.11 – Desgaste “Los Angeles” de los AGR de la Serie B	65
Figura 5.12 – Variación del porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM de 75 μ m para los AGR de la Serie A.....	66
Figura 6.1 – Composición del agregado grueso utilizado en cada hormigón HR-B.....	71
Figura 6.2 – Asentamiento de los hormigones HR-A.....	73
Figura 6.3 – Asentamiento de los hormigones HR-B.....	73

Figura 6.4 – Peso por unidad de volumen de los hormigones HR-A.....	74
Figura 6.5 – Peso por unidad de volumen de los hormigones HR-B.....	75
Figura 6.6 – Contenido de aire naturalmente incorporado de los hormigones HR-A.....	76
Figura 6.7 – Absorción de agua de los hormigones HR-A y HC.....	77
Figura 6.8 – Densidad en condición saturada y superficie seca de los HR-A y HC.....	78
Figura 6.9 – Densidad en condición seca de los HR-A y HC.....	78
Figura 6.10 – Porosidad de los hormigones HR-A y HC.....	79
Figura 6.11 – Absorción de agua de los hormigones HR-B.....	79
Figura 6.12 – Densidad en estado seco de los HR-B y HC.....	80
Figura 6.13 – Porosidad de los hormigones HR-B y HC.....	81
Figura 6.14 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.40.....	82
Figura 6.15 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.50.....	82
Figura 6.16 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.60.....	83
Figura 6.17 – Variación de la resistencia a compresión de los hormigones HR-A y HC con la razón a/c.....	83
Figura 6.18 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.50.....	84
Figura 6.19 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.40.....	85
Figura 6.20 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.60.....	86
Figura 6.21 – Resistencia a compresión de los hormigones HR-B y HC.....	86
Figura 6.22 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-A.....	87
Figura 6.23 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-A y HC.....	88
Figura 6.24 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-B y HC.....	89
Figura 6.25 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-A.....	90
Figura 6.26 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-A y HC.....	91
Figura 6.27 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-B y HC.....	92
Figura 6.28 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-A.....	93
Figura 6.29 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-A y HC.....	94
Figura 6.30 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-B y HC.....	94
Figura 6.31 – Broca diamantada.....	95
Figura 6.32 – Testigo calado y base para apoyo de la celda de carga del ensayo Break-Off.....	96
Figura 6.33 – Celda de carga, válvula de presión y manómetro del equipo Break-Off.....	96
Figura 6.34 – Variación de la presión Break-Off con la razón a/c.....	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 – Variación de las propiedades de los AGR con la calidad del hormigón original y el tamaño de partícula	14
Tabla 2.2 – Propiedades de los agregados gruesos reciclados en función del tipo de roca natural	15
Tabla 2.3 – Absorción de agua del agregado grueso reciclado en función del tiempo de inmersión y la edad de trituración.....	17
Tabla 2.4 – Propiedades en estado fresco de hormigones convencionales y reciclados en función de la calidad del agregado grueso reciclado	24
Tabla 2.5 – Relaciones entre asentamiento, factor de compactación y tiempo Vebe para hormigones convencionales y reciclados	25
Tabla 2.6 – Resistencia a compresión de hormigones reciclados en función de la calidad del agregado grueso reciclado	27
Tabla 2.7 – Resistencia a compresión en función de la calidad del agregado reciclado	28
Tabla 3.1 – Requerimientos para los agregados reciclados según el Código Alemán DafStb ...	38
Tabla 3.2 – Requerimientos para los agregados reciclados según la Recomendación RILEM.....	39
Tabla 3.3 – Requisitos adicionales según la Recomendación RILEM	39
Tabla 3.4 – Requisitos exigidos a los agregados reciclados según el Proyecto de Recomendación Española.....	40
Tabla 3.5 – Campo de aplicación y restricciones concernientes a los hormigones conteniendo agregados reciclados, según el Código GafStb	43
Tabla 3.6 – Máxima cantidad de agregado reciclado referido a: a) la cantidad total de agregado; b) la fracción granular.....	43
Tabla 3.7 – Restricción al empleo de hormigones reciclados, según el tipo de agregado reciclado y clase de exposición	45
Tabla 3.8 – Criterios de durabilidad para los hormigones reciclados según la Recomendación RILEM.....	45
Tabla 3.9 – Coeficientes a aplicar para la estimación de las propiedades de los hormigones reciclados, según la Recomendación RILEM.....	48
Tabla 5.1 – Índices de lajas y de elongación de los AGR de la Serie A y AGN	67
Tabla 6.1 – Hormigones reciclados elaborados con cada muestra de AGR de la Serie A	70
Tabla 6.2 – Proporciones de los materiales (kg/m ³)	70
Tabla 6.3 – Proporciones de las mezclas elaboradas con los AGR de la Serie B (kg/m ³).....	81

NOMENCLATURA

AN: Agregado natural

AR: Agregado reciclado

AGN: Agregado grueso natural

AGR: Agregado grueso reciclado

AFR: Agregado fino reciclado

a/c: razón agua/cemento

Dss: Densidad en condición de saturado y superficie seca

Ds: Densidad en condición seco

Ab: Absorción de agua

IL: Índice de lajas

IE: Índice de elongación

PUV: Peso por unidad de volumen

HC: Hormigón convencional

HR: Hormigón reciclado

f'c: Resistencia a compresión

PPG: Piedra partida granítica

s: Desvío estándar

δ : Coeficiente de variación

Capítulo 1

INTRODUCCION

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

En la antigüedad, la extracción de materiales naturales demandaba grandes esfuerzos por lo que el hombre aprovechaba al máximo los restos de materiales y estructuras temporarias originados durante la ejecución de las estructuras principales, logrando de esta manera reducir la cantidad de dichos materiales los que de otro modo eran desechados.

Posteriormente, con la llegada de la revolución industrial y más tarde el avance tecnológico en materia de equipos, que permitieron un procesamiento más eficiente de los diferentes materiales, surgió la idea que todo lo viejo no servía y debía descartarse dando lugar a los nuevos materiales, hecho que trajo como consecuencia una acumulación de los materiales desechados.

La industria de la construcción se ha caracterizado a lo largo de los años por emplear los desechos generados por otras industrias como nuevos materiales para la elaboración de hormigones. Algunos ejemplos son el empleo de cenizas volantes y humo de sílice, generadas en las centrales eléctricas, o las cenizas de cáscara de arroz, las cuales son utilizadas como adiciones minerales en reemplazo parcial del cemento en la elaboración de hormigones. Las escorias granuladas de alto horno, que resultan como desecho de la elaboración del acero, son empleadas como agregados en la elaboración de hormigones o bien son finamente molidas e incorporadas al cemento portland como una adición, dando lugar a los cementos bifásicos y/o trifásicos en el caso de incorporar además otra adición. Otro ejemplo del empleo de materiales de desecho lo constituye la utilización de arenas de fundición en reemplazo de los agregados naturales o de catalizadores, con el fin de mejorar la durabilidad del hormigón. En otros casos, el hormigón ha sido utilizado simplemente para darle una deposición final a muchos de estos residuos, como es el caso de la incorporación de distintos desechos plásticos en materiales cementicios.

Durante los últimos años, el interés por el reciclado de todo tipo de materiales de desecho para la elaboración de nuevos materiales ha cobrado una gran importancia. En el caso de la Ingeniería Civil este hecho ha alcanzado también un nivel relevante ya que por diferentes motivos, como la escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente los problemas de índole ambiental que originan los depósitos de residuos de construcción y demolición, han llevado a la búsqueda de nuevas aplicaciones de estos materiales.

Debido a que el hormigón es uno de los materiales de construcción más empleados en el mundo a lo largo de la historia, los volúmenes de desechos que genera esta industria son también extremadamente elevados. *Lauritzen (2005)* señala que en la Comunidad Europea se estima que la generación de desechos de construcción y demolición es del orden de los 200-300 millones de toneladas anuales, lo cual equivale entre $\frac{1}{2}$ a 1 tonelada per capita por año. Asimismo, un estudio reveló que aproximadamente el 28 % de estos desechos fueron reciclados hacia fines de la década del '90. En Estados Unidos se estima que los desechos alcanzan valores de 250-300 millones de toneladas/año. Por su parte, en Japón se generaron 85 millones de toneladas de desechos de construcción durante el año 2000, de los cuales un 40 % corresponde a desechos de hormigón [*Kasai, 2005*].

La industria del hormigón emplea a nivel mundial aproximadamente 10 billones de toneladas de arena y roca natural, a la vez que genera más de 1 billón de toneladas de desecho de construcción y demolición cada año. [*Metha, 2002*].

Con el propósito de lograr vincular la tecnología del hormigón con el desarrollo sustentable, el American Concrete Institute (ACI) creó en el año 2000 un grupo de trabajo cuyo objetivo era fomentar el desarrollo y la aplicación de materiales sustentables, de manera que resulten ambientalmente amigables [*Malhotra, 2002*].

El reciclado de los materiales permite que su ciclo de vida sea más eficiente y acorde con las tendencias de protección del medio ambiente. Esto se logra partiendo de un material de los llamados de primera generación, el cual tras un proceso de transformación se convierte en un insumo que, luego de un proceso de producción o servicio, agota su vida útil y se convierte en un material de desecho. Si este material de desecho sufre otro proceso de transformación, se genera un nuevo material (llamado de segunda generación) el cual puede insertarse dentro de un nuevo insumo, siendo el caso óptimo cuando se lo emplea dentro del mismo insumo del que proviene, logrando de este

modo una mayor eficiencia de vida del material, hecho que sucede con el reciclado de hormigones para su utilización como agregados en la elaboración de nuevos hormigones [Vázquez y Barra, 2002].

Los desechos de construcción y demolición procesados mediante una simple trituración dan lugar a un material granular con una buena aptitud para su empleo como material de relleno o para la construcción de bases y sub-bases de caminos. Pero sin lugar a dudas, el reciclado de los mismos para su uso como agregados en la producción de nuevos hormigones constituye una alternativa relevante y a la vez deseable tanto desde el punto de vista ecológico como económico. Para que esto sea posible, se debe efectuar una primera clasificación del material de desecho, previo al proceso de trituración, de manera de eliminar aquellos materiales indeseables como son los metales, madera, asfalto, yeso, vidrio, cerámica, suelo, etc. Luego de la trituración se efectúa una clasificación final y lavado del material granular resultante, de manera de eliminar la mayor cantidad posible del polvo adherido, obteniéndose así lo que se denomina Agregado Reciclado (AR).

Al igual de lo que sucede con los agregados naturales utilizados para la elaboración de hormigones, en el caso de los AR resulta aún más importante conocer previamente sus propiedades físico-químicas, mecánicas y durables.

En un agregado natural las propiedades dependen de las características de la roca original a partir de la cual fueron obtenidos, mientras que en los agregados reciclados sus propiedades dependerán de las características de la roca natural pero fundamentalmente de la calidad del mortero del hormigón original que forma parte de este nuevo agregado [Hansen y Narud, 1983].

La característica más distintiva que presentan los AR en comparación con algunos agregados naturales se centra en su elevada absorción de agua, motivada por la presencia de mortero y/o pasta adherida al agregado original. Esta situación altera las propiedades de los agregados reciclados respecto a sus pares naturales, a la vez que provoca modificaciones en las características de las mezclas en estado fresco y también en las propiedades del hormigón endurecido. Según la normativa alemana, en principio y como condición necesaria, los hormigones elaborados con agregados reciclados procedentes de la trituración de hormigones, deberán cumplir con los mismos requisitos que se exigen a un hormigón convencional elaborado con agregados naturales de densidad normal [Grübl y Rühl, 1998].

De manera similar a lo que sucede con los agregados naturales obtenidos por trituración (piedras partidas granítica, cuarcítica, etc.), en los cuales al efectuar la clasificación por tamaños se genera un desecho o sobrante con partículas de tamaño inferior a los 6 mm (denominado material 0-6), y el cual es empleado en muchos casos como arena de trituración, durante la trituración de hormigones también se genera un material que puede asemejarse al mencionado pudiendo, a partir de efectuar su separación por medio de una malla de abertura 4.75 mm, clasificar a los agregados reciclados en gruesos (AGR) y finos (AFR) según queden retenidos o pasen dicho tamiz respectivamente.

A nivel nacional, hacia mediados de la década del '90 se publicó el primer trabajo de investigación sobre agregados reciclados de hormigón [*Cúneo Simian y Durán, 1995*]. A comienzo del siglo XXI, y luego de 6 años sin una tenaz investigación sobre el tema en el ámbito nacional, se publicó un nuevo trabajo sobre hormigones reciclados [*Di Maio et al, 2001*], constituyendo hoy en día una de las principales líneas de investigación que se desarrollan en el LEMIT. En el año 2005, es el sector privado quien se incorpora al estudio de los agregados reciclados y de los hormigones con ellos elaborados [*Hernández y Fornasier, 2005*].

1.2 JUSTIFICACION

La necesidad de disposición de los residuos de construcción y demolición se originó en los grandes centros urbanos Europeos hacia fines de la década del '40, como consecuencia de la reconstrucción de las ciudades destruidas durante la Segunda Guerra Mundial [*Olorunsogo y Padayachee, 2002*]. Con el transcurso de los años, los volúmenes generados de dichos desechos han ido en continuo aumento, lo cual ha motivado la búsqueda de nuevas aplicaciones para estos materiales, siendo el reciclado de los mismos una alternativa interesante para uso como agregados en la producción de nuevos hormigones.

El empleo de los desechos de construcción y demolición como reemplazo parcial o total del agregado natural, fino o grueso, principalmente aquellos que provienen de la trituración de hormigones viejos, tiene su justificación en motivos relacionados fundamentalmente con:

- cuestiones medioambientales,
- conservación de recursos naturales,
- reducción de costos.

Con relación a las razones medioambientales, el empleo de los AR presenta dos beneficios: por un lado se utiliza un material de desecho, permitiendo disminuir las cantidades que se depositan en zonas inapropiadas, mientras que por otro lado se reduce la cantidad de agregados naturales que se extraen de las fuentes no renovables. En lo que se refiere a la explotación de canteras a cielo abierto, se produce una situación particular ya que en muchos casos se origina un gran impacto sobre el paisaje del lugar modificándolo, hecho que perjudica en cierta forma a la industria del turismo.

Los beneficios relacionados con cuestiones de costos, en nuestro país están fuertemente asociados con el transporte de los agregados naturales desde las fuentes de extracción hasta los centros urbanos donde se los emplea, ya que, en el caso de los agregados reciclados el lugar de generación es el mismo en el cual se dan las posibilidades de su empleo. A ello debe sumarse un beneficio económico relacionado con la trituración de los hormigones, ya que la energía consumida podría resultar menor que cuando se tritura piedra natural, debido a una menor resistencia por parte de los mismos.

Por tal motivo, resulta indispensable en primera instancia tomar conocimiento en laboratorio de las características físico-mecánicas que poseen los AR, como así también de la influencia que tienen sobre las propiedades de los hormigones con ellos elaborados.

1.3 OBJETIVOS

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en dos etapas, la primera de las cuales tiene como objetivo evaluar distintas propiedades físico-mecánicas y durables de los agregados gruesos reciclados (AGR) (granulometría, módulo de finura, densidad, absorción de agua, desgaste “Los Angeles”, contenido de material fino - $< 75 \mu\text{m}$ -, índices de lajas y elongación y durabilidad en sulfato de sodio) cuando los mismos son obtenidos de la trituración de hormigones de desecho de características desconocidas y variadas, las que son comparadas con las de los agregados gruesos naturales (AGN) de tipo granítico, los cuales son los de mayor utilización en nuestra región.

Además, se evalúa la posible variación que pudieran tener dichas propiedades ante una permanente renovación en el acopio de agregados gruesos reciclados, situación semejante a la que se produce en los centros de reciclaje, donde se trituran y acopian agregados reciclados provenientes de hormigones de desecho de diferentes características tecnológicas y procedencia desconocida.

Asimismo, se evalúan algunas propiedades físicas y mecánicas de los AGR que resultaron de realizar reciclados sucesivos, partiendo para ello de un hormigón convencional elaborado con agregados naturales.

En la segunda etapa, se estudia la influencia que tiene la posible variación de las propiedades de los AGR sobre las características físico-mecánicas de hormigones de distinta razón agua/cemento elaborados con un 75 %, en volumen, de AGR en reemplazo del AGN. Se evalúan las propiedades de las mezclas en estado fresco, tales como el asentamiento, el peso por unidad de volumen y el contenido de aire naturalmente incorporado. En estado endurecido, se analiza el comportamiento de los distintos hormigones evaluando aspectos físicos (densidad, absorción de agua, porosidad) y el comportamiento mecánico en compresión. Se presentan también los módulos de elasticidad estático y dinámico y la velocidad del pulso ultrasónico.

Complementariamente, y con el propósito de conocer el comportamiento en flexión de los hormigones reciclados, se realizaron evaluaciones con un ensayo semi-destrutivo (Break-Off), mediante el cual se pueden obtener correlaciones con la resistencia a compresión en aquellos casos en que se deseen estimar las características resistentes del hormigón en estructuras construidas.

Capítulo 2

REVISION BIBLIOGRAFICA

Capítulo 2

REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUCCION

Como fue mencionado en el Capítulo 1, la necesidad de estudiar las propiedades que presentaban los agregados reciclados obtenidos de la trituración de los desechos de construcción y demolición surgió en el período de post-Guerra, con el fin de darles alguna utilidad, por lo cual los primeros estudios sobre la temática han comenzado a desarrollarse en los países que hoy conforman la Comunidad Europea.

En los años '80, aparecen a nivel internacional variados trabajos de investigación que evalúan las características de los agregados gruesos reciclados (AGR) con miras de emplearlos como reemplazo del agregado grueso natural en la elaboración de nuevos hormigones, evaluando asimismo las propiedades que presentaban dichos hormigones reciclados.

Hacia la década del '90, la temática comienza a relacionarse fuertemente con aquellas cuestiones netamente medio-ambientales, consiguiendo de este modo que la industria de la construcción siga contribuyendo al desarrollo sustentable.

A continuación se informa sobre resultados indicados en la bibliografía a nivel internacional, tanto los relacionados con los agregados reciclados como así también respecto a las propiedades de los hormigones reciclados con ellos elaborados.

2.2 AGREGADOS RECICLADOS

2.2.1 Generación

Los hormigones de desecho a partir de los cuales se obtienen los agregados reciclados (AR) pueden provenir de diversos orígenes, desde desperdicios de obras en

construcción hasta de la demolición parcial o total de estructuras, ya sea que se originen en reconstrucciones como así también por catástrofes naturales.

Existe una gran variedad de métodos y sistemas para la remoción del hormigón, desde diferentes tipos de herramientas de mano (neumática, hidráulica, eléctrica, a combustible) empleadas para trabajos menores, hasta equipos que van montados sobre vehículos (martillos de impacto neumático o hidráulico, bolas de demolición, cabezales cortadores rotativos, distintos tipos de sierras diamantadas, etc.) los cuales son utilizados para las principales tareas de demolición [ACI, 2002]. Cualquiera de estos métodos tiene por finalidad reducir el tamaño de los bloques de hormigón de manera de lograr un tamaño acorde con el medio de transporte disponible y/o con la abertura de boca y tipo de trituradora que se empleará para la obtención de los agregados reciclados.

Las plantas de producción de agregados reciclados son muy similares a las empleadas para la obtención de los agregados naturales, con algunas pequeñas modificaciones para la eliminación de los contaminantes que no suelen estar presente en estos últimos. Estas plantas de procesamiento de agregados pueden operar mediante sistemas abiertos o cerrados, siendo de preferencias los segundos ya que permiten tener un mayor control sobre el tamaño máximo de partícula obtenido [ACI, 2002].

En las Figuras 2.1 y 2.2 se presentan los esquemas de funcionamiento de cada una de las plantas de producción con sistemas abierto y cerrado respectivamente.

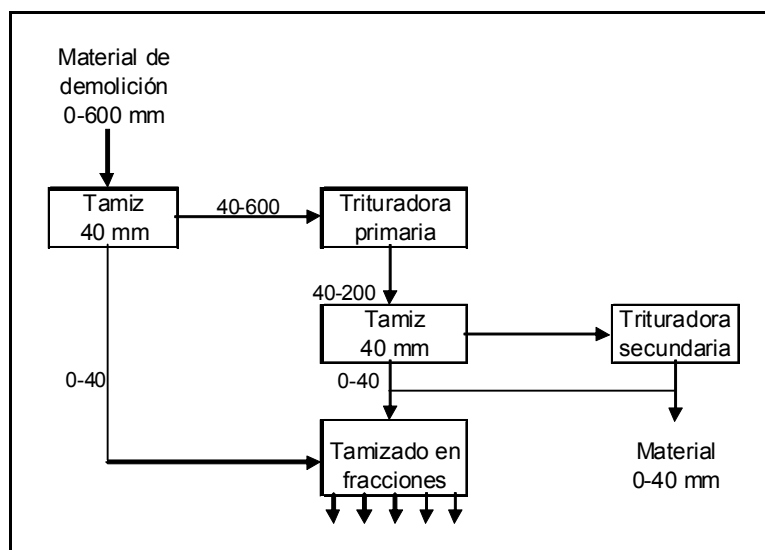


Figura 2.1 – Diagrama de flujo de una planta con sistema abierto para la producción de agregados reciclados.

[Adaptado de ACI, 2002]

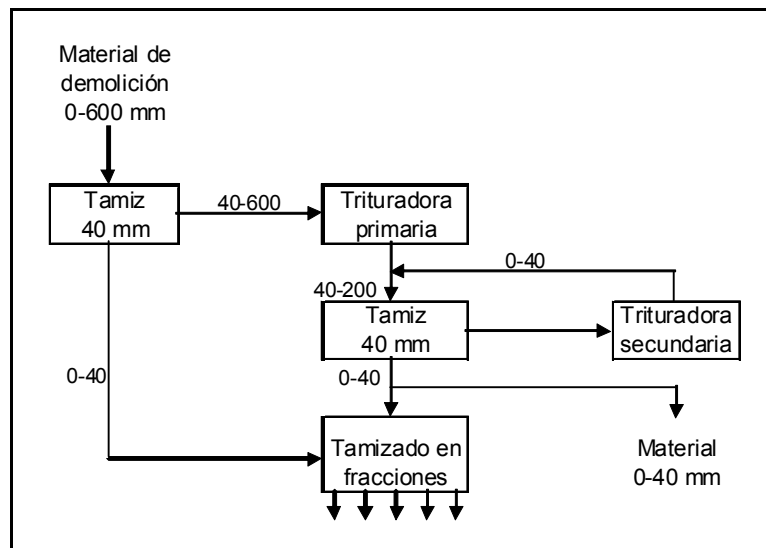


Figura 2.2 – Diagrama de flujo de una planta con sistema cerrado para la producción de agregados reciclados.

[Adaptado de ACI, 2002]

Dentro de los distintos tipos de trituradoras empleadas se pueden mencionar las de mandíbulas (Figura 2.3), de conos (Figura 2.4) y de impacto (Figura 2.5). Asimismo, el mercado ofrece equipos de distintas capacidades operativas los que a su vez podrán ser fijos o móviles según sean los requerimientos de la obra.

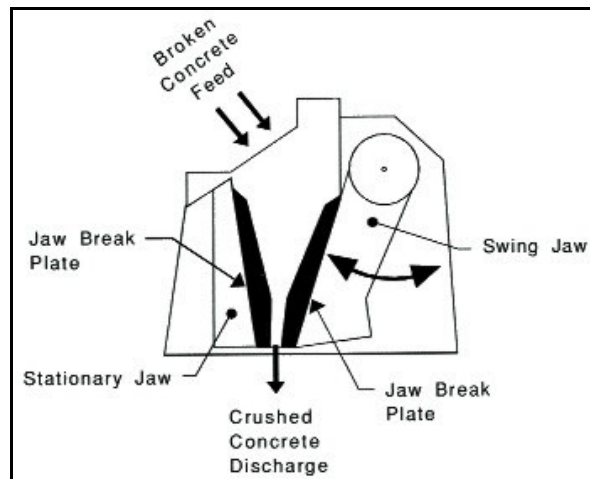
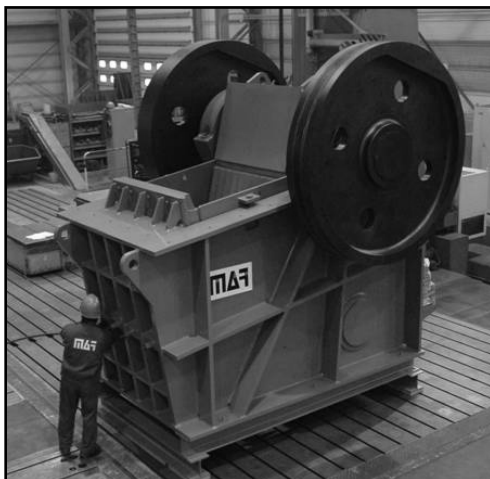


Figura 2.3 – Tritradora de mandíbulas. (Fuentes: www.fam.de; www.ecco.org)

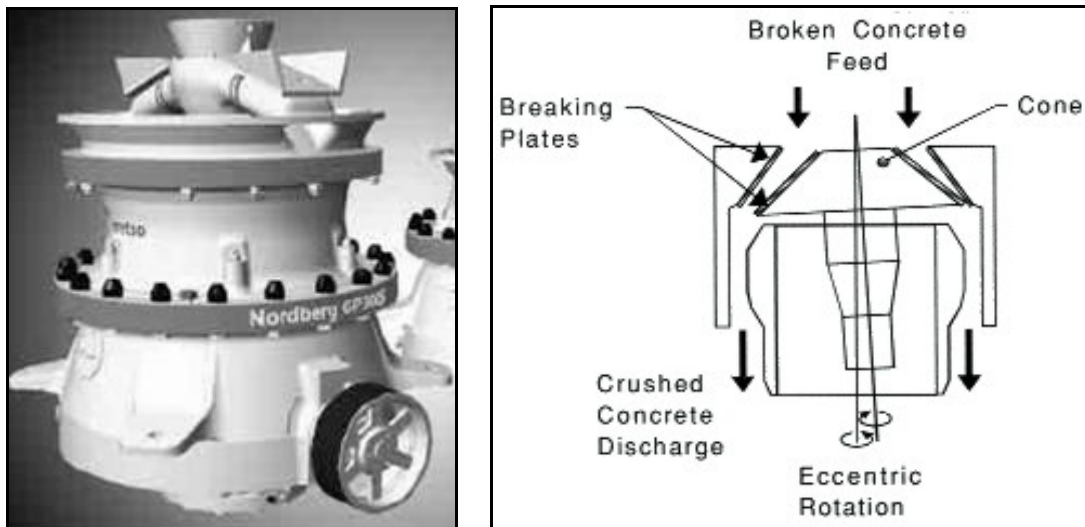


Figura 2.4 – Trituradora de conos. (Fuentes: www.metsominerals.com; www.ecco.org)

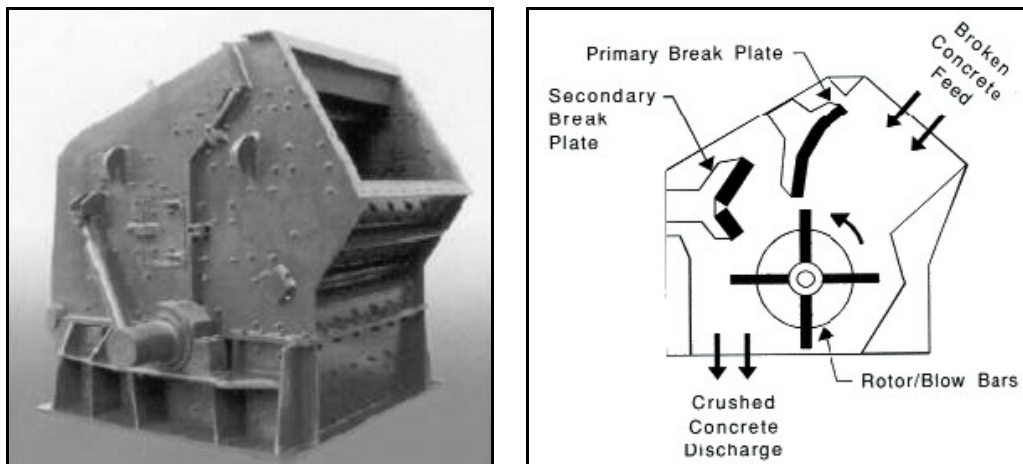


Figura 2.5 – Trituradora de Impacto. (Fuentes: www.crushers.de; www.ecco.org)

En la trituración de hormigones, de manera similar a lo que sucede en la trituración de las rocas, se genera una gran variedad de tamaño de partículas las cuales pueden ser clasificadas en primera instancia en las fracciones gruesa y fina, denominadas cada una de ellas agregado grueso reciclado (AGR) y fino reciclado (AFR).

En el informe del Comité 555 del American Concrete Institute [ACI, 2002] se indica que los agregados reciclados generados por medio de una trituradora de mandíbulas son los que presentan una mejor distribución de tamaño de partículas para la elaboración de hormigones, mientras que los obtenidos a partir de una trituradora de impacto son los que poseen una mejor gradación para su empleo en la construcción de caminos.

2.2.2 Aspecto visual

A simple vista, los AR presentan características diferentes a las de los agregados naturales. En el caso particular de los AR obtenidos de la trituración de hormigones de desecho, poseen una superficie más porosa debido al mortero y/o pasta de cemento proveniente del hormigón original que forma parte de los mismos.

Dicho mortero de cemento no siempre se encuentra adherido a las partículas de agregado natural, hecho que da lugar a la existencia de tres tipos diferentes de partículas que pueden formar parte de los AR. Así, los AGR podrán estar constituidos por partículas formadas enteramente de roca original, otras en las cuales el mortero se encuentra adherido a la roca o bien constituyendo partículas por sí solas. Estos tres tipos de partículas mencionadas se encuentran esquematizados en la Figura 2.6. Las cantidades relativas de cada una de ellas en el total de los agregados dependerá fundamentalmente de la calidad del hormigón que se tritura como así también del tipo de trituradora empleada.

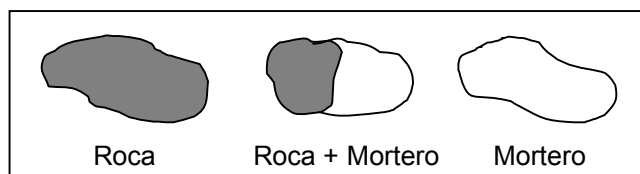


Figura 2.6 – Características de los agregados gruesos reciclados.

[Vázquez y Barra, 2002]

2.2.3 Distribución granulométrica

Algunas investigaciones realizadas por diferentes autores indican que la distribución granulométrica del agregado grueso reciclado es independiente del nivel resistente del hormigón a partir del cual son obtenidos [Hansen y Narud, 1983; Sri Ravindrarajah y Tam, 1985], y que los mismos pueden lograrse en una sola pasada por medio de una trituradora de mandíbulas. Asimismo, hacen referencia a que en la mayoría de los casos la granulometría del AGR se ubica dentro de los límites establecidos para los agregados gruesos naturales. Este hecho puede observarse también en la Figura 2.7, en la cual se compara el rango de granulometrías de agregados gruesos reciclados, con un tamaño máximo de 25 mm y obtenidos por medio de una trituradora de mandíbulas, con los límites granulométricos fijados por la norma ASTM C 33 para agregados gruesos naturales de igual tamaño máximo.

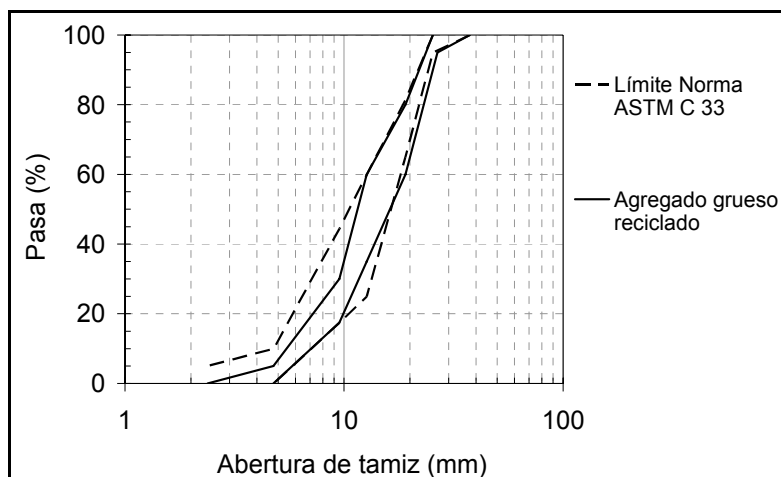


Figura 2.7 – Distribución granulométrica del agregado grueso reciclado.
[Adaptado de Hansen, 1986]

Otros autores han evaluado la influencia que tiene la edad del hormigón al momento de triturarlo sobre la granulometría del agregado reciclado, y observaron que los AGR obtenidos al triturar hormigones a edades comprendidas entre 1 y 28 días, con diferente resistencia y grado de hidratación, presentaban distribuciones granulométricas semejantes [Katz, 2003; Buttler, 2003] (Figura 2.8).

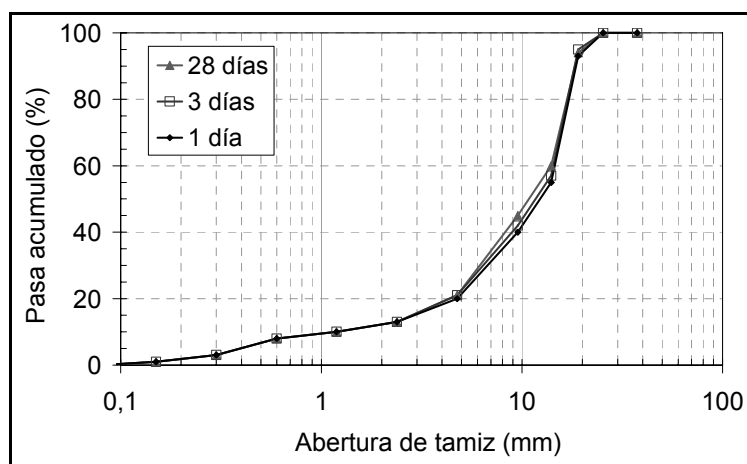


Figura 2.8 – Granulometría de los AR en función de la edad de trituración.
[Adaptado de Katz, 2003]

En cuanto a la cantidad de agregado fino reciclado (AFR) (partículas de tamaño < 4.75 mm) que se genera al triturar los hormigones, algunos autores han encontrado que dicha cantidad era mayor a medida que la resistencia del hormigón que se trituraba disminuía [Sri Ravindrarajah y Tam, 1985], producto del menor contenido de cemento y mayor cuantía de arena que presentan los hormigones más pobres; otros por su parte,

observaron un comportamiento diferente, indicando valores comprendidos entre 25 y 30 % independientemente de la resistencia del hormigón a partir del cual fueron obtenidos [Buttler, 2003].

Dentro de las características que presenta el AFR, puede mencionarse un módulo de finura muy superior al correspondiente a un agregado fino natural, e incluso mayor que el máximo establecido para la elaboración de hormigones estructurales [Hansen y Narud, 1983; Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002], no cumpliendo en la mayoría de los casos con los límites establecidos por las normas para las arenas naturales, o bien haciéndolo sólo en parte (Figura 2.9).

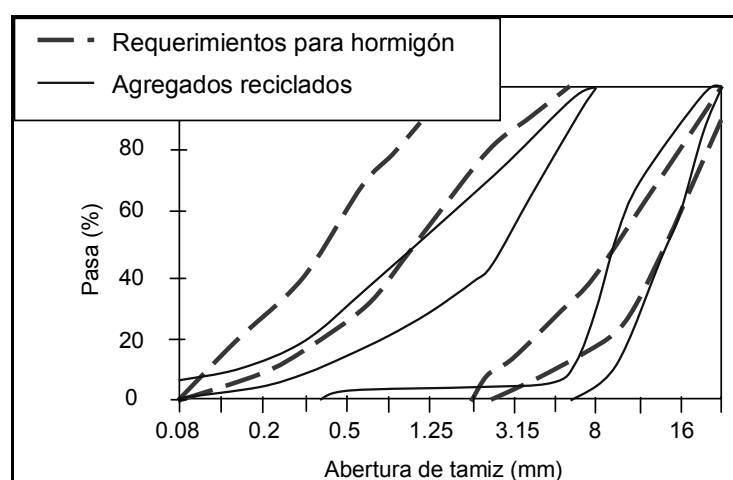


Figura 2.9 – Granulometría de los AGR y AFR.

[Adaptado de Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002]

2.2.4 Densidad

La presencia de mortero como parte constituyente de los AGR modifica su densidad con relación a la de los agregados naturales. En algunos estudios, los autores evaluaron la densidad de los agregados reciclados en función de la calidad del hormigón que se trituró para obtenerlos [Hansen y Narud, 1983; Sri Ravindrarajah y Tam, 1985; Vázquez y Barra, 2002].

De este modo, elaboraron hormigones de alta, media y baja calidad variando la razón a/c. A partir de estos hormigones obtuvieron AGR de tres calidades diferentes según el hormigón del cual provenían. Las densidades en condición de saturado y superficie seca (Dsss) se presentan en la Tabla 2.1. Puede observarse en primera instancia que la densidad de los agregados reciclados fue siempre inferior a la del

agregado natural, lo cual atribuyeron a que siempre se encontrará una cantidad apreciable de mortero, proveniente del hormigón original, adherida a las partículas de los agregados reciclados (Figura 2.6). Dicha disminución es del orden del 6-8 %.

Tabla 2.1 – Variación de las propiedades de los AGR con la calidad del hormigón original y el tamaño de partícula.

[Hansen y Narud, 1983]

Tipo de agregado	Fracción (mm)	Dsss	Absorción (%)	Desgaste "Los Angeles" (%)
Piedra partida granítica	4-8	2.50	3.7	25.9
	8-16	2.62	1.8	22.7
	16-32	2.61	0.8	18.8
Reciclado (calidad Alta)	4-8	2.34	8.5	30.1
	8-16	2.45	5.0	26.7
	16-32	2.49	3.8	22.4
Reciclado (calidad Media)	4-8	2.35	8.7	32.6
	8-16	2.44	5.4	29.2
	16-32	2.48	4.0	25.4
Reciclado (calidad Baja)	4-8	2.34	8.7	41.4
	8-16	2.42	5.7	37.0
	16-32	2.49	3.7	31.5

Asimismo, es posible observar que para agregados de una misma calidad la densidad disminuye levemente a medida que el tamaño de la fracción involucrada se reduce. Por otro lado, también se observa que las densidades de los agregados reciclados, para un tamaño dado de partículas, son similares entre sí independientemente de la calidad de dichos agregados.

En otras experiencias, los AGR se obtuvieron de la trituración de hormigones con un año de antigüedad (60 MPa) y también encontraron que la densidad de los mismos era 7 % inferior a la del agregado granítico [Sri Ravindrarajah et al, 1987].

Poon et al (2004) observaron que la densidad del AGR obtenido de la trituración de hormigones provenientes de edificios y pavimentos viejos era de 2.37, mientras que la del agregado granítico natural era de 2.62, es decir un 9.5 % inferior.

Estudios realizados en Estados Unidos [Tavakoli y Soroushian, 1996] sobre AGR provenientes de la trituración de hormigones de losas de dos pavimentos diferentes con más de 30 años de antigüedad, elaborados con agregado calizo natural triturado, concluyeron que las densidades (Dsss) de los AGR fueron 9 y 12 % inferiores a la del agregado natural.

La menor densidad que hallaron en uno de los AGR se correspondía con una mayor cantidad de mortero adherido a las partículas de dicho agregado, atribuyéndoselo a que el hormigón que dio lugar a ese agregado presentaba una menor relación agregado grueso/agregado fino y un mayor contenido unitario de cemento.

En concordancia con lo anterior, también se han encontrado disminuciones del 9 % en la densidad del AGR obtenido de la trituración de un hormigón con agregado calizo a la edad de 150 días [Gómez *et al*, 2001].

En los primeros estudios desarrollados sobre la temática en el LEMIT, se elaboraron hormigones convencionales de razones a/c 0.45 y 0.80 los cuales fueron triturados para generar dos agregados gruesos reciclados. Los valores de densidad (D_{ss}) de los AGR resultaron inferiores al del agregado natural granítico (2.42 contra 2.64 de estos últimos), y al igual que en las experiencias anteriormente mencionadas, ambos AGR presentaron similares valores de densidad [Di Maio *et al*, 2001].

Asimismo, cuando los agregados gruesos reciclados fueron obtenidos de la trituración de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales (AN), sus densidades en condición de saturado y superficie seca (D_{ss}) resultaron inferiores a las de los correspondientes agregados naturales utilizados, en porcentajes del 7.5 % para los AR1 (AGR de granito) y AR2 (AGR de canto rodado previamente triturado) y del 11 % para el AR3 (AGR de basalto) (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2 – Propiedades de los agregados gruesos reciclados
en función del tipo de roca natural.
[Cúneo Simian y Durán, 1995]**

Agregado Grueso	Módulo de finura	D _{ss}	Absorción (%)	Desgaste "Los Angeles" (%)
AN1	6.80	2.75	0.24	22.0
AN2	6.72	2.65	0.80	37.0
AN3	6.51	2.98	0.59	21.6
AR1	6.52	2.55	5.45	29.2
AR2	6.49	2.45	6.83	42.5
AR3	6.34	2.66	5.79	31.9

Experiencias realizadas en Brasil, empleando un agregado basáltico, mostraron que la densidad del agregado grueso reciclado fue un 15 % inferior a la del agregado natural [Machado y Latterza, 1997].

Hernández y Fornasier (2005) evaluaron agregados gruesos reciclados (fracción 6-20 mm) de dos orígenes diferentes: el AR1 obtenido en laboratorio mediante la trituración de muestras de hormigón (f_c : 17-47 MPa), y el AR2 obtenido de una planta de triturados proveniente de pavimentos con 15-20 años de antigüedad. La densidad del agregado AR2 fue un 3 % inferior a la del agregado AR1, y ambos agregados reciclados presentaron densidades inferiores a la del agregado granítico natural, 8.5 % (AR1) y 11.4 % (AR2).

La menor densidad que presentan los AGR en comparación con la de los agregados gruesos naturales es atribuida, en todos los casos, a la composición propia que posee este material, cuyas partículas pueden estar constituidas por roca original y mortero de cemento en proporciones variables, desde un 100 % de agregado natural hasta un 100 % de mortero. La mayor porosidad que presenta el mortero de cemento es lo que provoca que la densidad de los agregados gruesos reciclados experimente una disminución del orden del 6-15 % con relación a la de los agregados naturales. Asimismo, y en términos de porcentaje, puede evidenciarse una mayor disminución cuanto más alta es la densidad del agregado grueso natural.

2.2.5 Absorción de agua

Diferentes estudios realizados a nivel internacional indican que agregados gruesos reciclados de distintos tipos arrojan valores de absorción de agua en 24 horas de entre 5 y 7 %, muy superiores a los del agregado grueso natural, que en general se encuentran debajo del 1 % [*Sri Ravindrarajah y Tam, 1985; Gómez et al, 2001; Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002; Poon et al, 2004*].

Cuando los agregados reciclados fueron obtenidos a partir de la trituración de hormigones de diferentes calidades (distinta razón a/c), las absorciones resultaron muy similares entre sí independientemente de dicha calidad, obteniendo valores de 5.4 % para la fracción 8-16 mm y de 3.8 % para la fracción 16-32 mm aproximadamente [*Hansen y Narud, 1983*]. Ambos resultados fueron muy superiores a los del agregado natural (1.8 % y 0.8 % para cada fracción respectivamente). Al igual que en el caso de la densidad, este comportamiento es atribuido al mortero del hormigón original existente entre las partículas de agregados reciclados (Tabla 2.1).

Estudios realizados a nivel nacional llegaron a las mismas conclusiones mencionadas en el párrafo anterior, habiendo obtenido para el agregado grueso reciclado absorciones de agua de 5.4 % mientras que la del agregado natural fue de 0.5 % [Di Maio et al, 2001].

En el caso de AGR provenientes de hormigones elaborados con distintos tipos de agregados naturales, las absorciones oscilaron entre 5.5 y 7 %, siendo la de los agregados naturales inferiores al 1 % (Tabla 2.2) [Cúneo Simian y Durán, 1995].

Debido a que la pasta de cemento constituye un sistema dispersivo estable, en el cual la fase acuosa se encuentra saturada de iones y los granos de cemento están cargados eléctricamente, la cantidad de agua que el agregado reciclado puede absorber depende de que el mismo se ponga en contacto directo sólo con el agua de mezclado, con la pasta o con el mortero del hormigón. Asimismo, dicha propiedad también dependerá de la condición inicial de humedad en que se halle el agregado y del tiempo en que el mismo permanece en contacto con el agua [Vázquez y Barra, 2002].

La capacidad de absorción de agua a 10 min, 30 min y 24 horas de agregados gruesos reciclados obtenidos de la trituración de hormigones a distintas edades, fue evaluada por *Buttler* (2003). Los valores de absorción obtenidos para los AGR triturados a la edad de 1 día eran inferiores a los obtenidos a las otras edades de trituración, para los tres tiempos de determinación, no existiendo diferencias apreciables entre las absorciones de los agregados que fueron triturados a 7 y 28 días (Tabla 2.3). Este hecho fue atribuido a la menor cantidad de mortero adherido que presentó dicho agregado, el cual se pudo haber despegado durante el proceso de trituración como consecuencia de un bajo grado de hidratación del cemento. Asimismo, observó que para las tres edades de trituración los valores de absorción de agua determinados a 30 min representan aproximadamente el 90 % de la absorción total a 24 horas.

Tabla 2.3 – Absorción de agua del agregado grueso reciclado en función del tiempo de inmersión y la edad de trituración.

[Buttler, 2003]

Tiempo	Absorción de agua del AGR (%)		
	Edad de trituración (días)		
	1	7	28
10 min	4.74	5.67	5.51
30 min	4.84	5.81	5.68
24 horas	5.48	6.41	6.16

En un estudio realizado sobre diferentes partidas de agregados reciclados obtenidos de una planta de reciclaje, en distintas épocas del año, *Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2003)* indicaron que los valores de absorción de los AGR son, en casi todas las muestras, muy superiores al límite del 5 % impuesto en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE). El coeficiente de variación de esta propiedad fue de 25.5 %. Asimismo, señalaron que en combinación con un agregado natural de baja absorción es posible que el valor de absorción del conjunto granular satisfaga el límite mencionado. En estas condiciones, los porcentajes de reemplazo que cumplen con lo antedicho se hallan entre el 20-45 %; 10 % de absorción para el reciclado y entre 1-3.75 % para el natural.

La alta porosidad del material reciclado, la tendencia a su disgregación y la gran cantidad de material fino presente en los mismos, son consideradas como las principales causas de distorsión que pueden ocurrir en la determinación de la tasa de absorción del agregado reciclado por medio de los métodos descritos en las normas vigentes para agregados naturales. Por tal motivo, *Leite et al (2000)* presentaron el desarrollo de un método alternativo para la determinación de la tasa de absorción de los agregados reciclados.

El método propuesto consiste en secar la muestra en estufa a 100 °C hasta masa constante, registrándose este valor. Luego se coloca la muestra, seca y fría, en un recipiente, se tapa y se sumerge en agua de modo que pueda registrarse el peso sumergido. Se registra el incremento de peso de la misma al estar sumergida en agua a distintos intervalos de tiempo hasta 24 hs de iniciado el ensayo, determinándose las tasas de absorción seca y sumergida, y adoptando como tasa de absorción del material reciclado la resultante del promedio de las dos anteriores. Las respectivas tasas de absorción seca y sumergida se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$A_{SECA}(\%) = \frac{M_{SUM-F} - M_{SUM-0}}{M_{SECA}} \quad (1) \quad A_{SUM}(\%) = \frac{M_{SUM-F} - M_{SUM-0}}{M_{SUM-0}} \quad (2)$$

Donde:

$A_{SECA}(\%)$: tasa de absorción del material seco

$A_{SUM}(\%)$: tasa de absorción del material sumergido

M_{SUM-F} : masa de material sumergido en el instante final

M_{SUM-0} : masa de material sumergido en el instante inicial

M_{SECA} : masa de material seco en estufa

Por medio de este método han encontrado que la tasa de absorción del agregado grueso reciclado a 30 minutos de iniciado el ensayo es del 57 % de la correspondiente a 24 horas (4.95 %). Esto no se condice con lo hallado por otros autores como fue mencionado anteriormente. Asimismo, indican que cuanto menor es el tamaño máximo de la muestra a ensayar mayor será la tasa de absorción, obteniendo para el agregado fino reciclado una tasa de absorción a 30 minutos del 66 % de la correspondiente a 24 horas (8.6 %).

De lo indicado en la bibliografía sobre la capacidad de absorción de agua que presentan los AGR, puede observarse que la presencia de mortero como parte constituyente de los mismos hace que los valores obtenidos de dicho parámetro presenten una gran variación, pudiendo ser desde 2 hasta 30 veces superior al correspondiente a un agregado natural. En este sentido, se observa que para rocas naturales con absorciones inferiores al 1 % la correspondiente a los agregados reciclados se encuentra, en general, por debajo del 5 %; mientras que cuando el agregado natural tiene absorciones del 2-3 %, el agregado reciclado puede presentar valores del orden del 10 %, hecho que estaría indicando que la capacidad total de absorción de agua de los AGR está influenciada tanto por el mortero que forma parte de los agregados reciclados como por la calidad de la roca a partir de la cual se obtuvo el agregado natural.

2.2.6 Resistencia al desgaste con la máquina “Los Angeles”

En algunos estudios se analiza la pérdida de peso que experimentaron los AGR en el ensayo “Los Angeles” cuando los mismos fueron obtenidos de la trituración de hormigones de distintas calidades (distinta razón a/c). En algunos estudios se encontró un aumento del porcentaje de desgaste a medida que la calidad del agregado reciclado disminuía (mayor razón a/c) [Hansen y Narud, 1983]. En este caso, también lo atribuyeron al mortero adherido a las partículas de agregados (Tabla 2.1). En otros casos, en cambio, se obtuvieron valores de desgaste que fueron independientes de la calidad del hormigón original (~ 40 %), mientras que el agregado natural poseía un valor de 18.1 % [Sri Ravindrarajah y Tam, 1985].

En concordancia con el primero de los autores mencionados, Vázquez y Barra (2002) encontraron también un mayor desgaste en el agregado reciclado comparado con el natural, y dentro de ellos un desgaste algo mayor para el proveniente de un hormigón de mayor razón a/c.

Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2003) obtuvieron valores de pérdida de peso en el ensayo “Los Angeles” superiores al 40 % (variación del 5.1 %), siendo éste último el límite máximo que establece la Instrucción EHE para los agregados naturales.

Cúneo Simian y Durán (1995) también determinaron que los agregados gruesos reciclados tenían mayores valores de desgaste que los correspondientes agregados gruesos naturales en un 33, 15 y 48 % para cada agregado AR1, AR2 y AR3 respectivamente (ver Tabla 2.2).

Buttler (2003) indicó que el agregado reciclado que obtuvo al triturar el hormigón de referencia a la edad de 1 día presentó una pérdida del 41.7 %, mientras que los triturados a las edades de 7 y 28 días tuvieron valores del orden del 30 %. El agregado grueso natural tenía un desgaste del 20.5 %.

Hernández y Fornasier (2005) han observado también que los agregados reciclados presentaban una mayor pérdida de peso por desgaste que la piedra granítica natural, siendo en uno de los casos un 70 % y en el otro un 110 % superior al de esta última.

Como conclusión de lo expuesto en diversos trabajos de investigación en lo que se refiere a la pérdida de peso que sufre el AGR al ser evaluado por medio del ensayo “Los Angeles” puede concluirse que, al igual que en el caso de la absorción, en la determinación de éste parámetro también tiene una gran influencia tanto la calidad de la roca natural como la del mortero que forma parte de los agregados reciclados, presentando el ensayo de desgaste una gran variación entre diferentes muestras de AGR.

2.2.7 Porosidad

Diferentes autores han evaluado ésta propiedad sobre distintas muestras de agregados gruesos reciclados, obteniendo valores comprendidos entre 12.5 y 16 %, presentando los agregados gruesos naturales porosidades de entre 0.3 y 3 % [*Gómez et al, 2001; Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002; Vázquez y Barra, 2002*].

Se observa una gran diferencia entre la porosidad del agregado natural y la del reciclado, lo cual es siempre atribuido al mortero de cemento que se encuentra presente en los agregados reciclados.

2.2.8 Contenido de mortero adherido a los agregados

La presencia de mortero, como ya se dijo, es la causante de las mayores diferencias existentes entre las propiedades de los agregados reciclados y la de los naturales. En tal sentido, algunos autores han encontrado que el contenido de mortero presente en los agregados reciclados se incrementa a medida que el tamaño nominal del mismo disminuye [*Hansen y Narud, 1983; Limbachiya et al, 2000*]. Sin embargo, el primero de los autores obtuvo contenidos del 39 % para la fracción 8-16 mm y del 60 % para la 4-8 mm, en tanto que el segundo obtuvo porcentajes muy inferiores a estos, 9.3 y 11.5 % en cada una de ellas respectivamente. Asimismo, indican que para una misma fracción de agregados reciclados obtenidos de hormigones de calidades diferentes, los porcentajes indicados no presentan diferencias significativas [*Hansen, 1986*].

Se podría pensar que al disminuir la calidad del hormigón que se tritura, la cantidad de mortero que se encuentre adherido a los agregados reciclados será mayor, aunque en realidad factores propios de las mezclas tales como el contenido unitario de cemento, la relación ag.grueso/ag.fino, tamaño máximo del agregado, etc., tendrán una influencia importante sobre la cantidad de mortero adherido que puede encontrarse en los agregados reciclados.

2.2.9 Índices de lajas y elongación

En general, se ha encontrado que la presencia del mortero adherido a las partículas de roca natural produce una modificación en la forma de las partículas de los agregados reciclados, dando como resultado menores valores para el índice de lajas de los mismos [*Gómez et al, 2001*], presentando valores del 17 % contra un 21 % del agregado natural, mientras que el índice de elongación no parece seguir la misma tendencia [*Hernández y Fornasier, 2005*].

2.2.10 Durabilidad por ataque con sulfato de sodio

Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva (2002) estudiaron el comportamiento de los agregados naturales y reciclados frente al ataque físico por precipitación de sales de sulfatos (según Norma ASTM C 88), encontrando que el agregado natural sufrió una pérdida del 3.8 %, en tanto que la del reciclado fue del 26.4 %.

2.2.11 Contenido de material fino

Si bien el contenido de finos presente en el agregado grueso reciclado es superior al del agregado natural, en la mayoría de los casos este valor ha estado por debajo del límite EHE del 1 % [*Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2003*].

Dicho comportamiento dependerá de la limpieza que tenga el material, pudiendo en algunos casos presentar cantidades de polvo semejantes al del agregado natural. *Hernández y Fornasier (2005)* hallaron que uno de los agregados reciclados presentaba un porcentaje de material fino similar al del agregado natural mientras que en el otro agregado dicho porcentaje era levemente superior.

2.2.12 Contenido de cloruros y sulfatos

El contenido de cloruros, totales o solubles en agua, fue siempre inferior a 0.005 %, muy por debajo del límite de la EHE (0.05 %). En cuanto a los sulfatos, los valores determinados en las muestras de agregados reciclados dieron valores de 0.42 % (solubles en ácido) y 0.58 % (compuestos totales de azufre) los cuales son inferiores a los límites de la EHE, 0.8 % y 1.0 % respectivamente [*Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2003*].

2.3 HORMIGONES RECICLADOS

2.3.1 Estado Fresco

Debido a las diferencias anteriormente mencionadas existentes entre las propiedades de los agregados gruesos reciclados respecto a las de los agregados gruesos naturales, fundamentalmente en lo referente a su mayor porosidad, las propiedades en estado fresco de los hormigones elaborados con dichos agregados reciclados podrán sufrir modificaciones con relación a las de los hormigones convencionales de similares características.

2.3.1.1 Asentamiento

La elevada porosidad, y por lo tanto, la mayor capacidad de absorción de agua que presentan los AGR hace que al momento de emplearlos para la elaboración de las mezclas puedan producirse modificaciones importantes en la trabajabilidad de las mismas, si dicha absorción de agua no es tenida en cuenta.

El bajo coeficiente de absorción efectivo de los agregados naturales hace que prácticamente no se produzca ninguna variación en el contenido de agua de mezclado del hormigón. Esto no sucederá con los agregados reciclados ya que poseen un elevado coeficiente de absorción. La cantidad de agua que el agregado puede succionar, como ya se mencionó, dependerá de que el mismo entre en contacto directo sólo con el agua de mezclado, con la pasta o con el mortero [Vázquez y Barra, 2002].

En algunos estudios, los AGR han sido empleados en las mismas condiciones de humedad en que se usan los agregados naturales, es decir, secos al aire, debiendo agregar un contenido de agua extra a las mezclas con ellos elaborados, del orden de 10 a 15 lts/m³, para obtener asentamientos semejantes a los de mezclas de similares características elaboradas con agregados naturales [Hansen y Narud, 1983; Sri Ravindrarajah y Tam, 1985]. En la Tabla 2.4 se presentan los resultados informados en uno de dichos estudios, donde las designaciones H, M y L corresponden a hormigones convencionales de alta, media y baja calidad respectivamente. En el caso de los hormigones reciclados, la designación empleada comprende tres letras, la primera indica el nivel resistente del nuevo hormigón, la segunda (r) hace referencia a que se trata de mezclas recicladas, y la tercera indica la calidad del hormigón original que dio origen a los AGR; así el HrM corresponde a un hormigón reciclado de alta calidad elaborado con un agregado grueso reciclado derivado de un hormigón convencional de calidad media.

Tabla 2.4 – Propiedades en estado fresco de hormigones convencionales y reciclados en función de la calidad del agregado grueso reciclado.

[Sri Ravindrarajah y Tam, 1985]

Mezclas	Calidad de la matriz	Calidad del agregado	Asentamiento (mm)	PUV (kg/m ³)
H	Alta	-	55	2370
HrH		Alta	65	2250
HrM		Media	75	2280
HrL		Baja	65	2320
M	Media	-	25	2360
MrH		Alta	85	2250
MrM		Media	60	2260
MrL		Baja	65	2260
L	Baja	-	30	2340
LrH		Alta	50	2240
LrM		Media	80	2240
LrL		Baja	45	2250

Puede observarse que los asentamientos resultaron similares en todos los hormigones reciclados independientemente de la calidad del agregado reciclado y de la matriz del hormigón reciclado. En el caso de los hormigones convencionales M y L, los asentamientos fueron inferiores a los determinados en los otros casos pero los autores no indican nada al respecto.

En otros casos, en cambio, ajustaron la cantidad de agua de mezclado de las mezclas recicladas en función de la absorción que tenían los AGR, considerando la condición de saturado y superficie seca y empleándolos en estado de humedad secos al aire [Sri Ravindrarajah et al, 1987]. Empleando ésta metodología de trabajo, los autores indican no haber encontrado diferencias entre los asentamientos medidos en las mezclas elaboradas con agregados gruesos reciclados y los obtenidos en las mezclas con agregados graníticos naturales.

De manera contraria a lo mencionado, Rasheeduzzafar (1984) observó que para un mismo tipo de mezcla, la elaborada con agregado reciclado presentó un asentamiento muy superior al correspondiente a la mezcla elaborada con agregado calizo natural (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 – Relaciones entre asentamiento, factor de compactación y tiempo Vebe para hormigones convencionales y reciclados.

[Rasheeduzzafar, 1984]

a/c	H° Convencional			H° Reciclado		
	Asent. (mm)	Vebe (seg)	Factor Compact.	Asent. (mm)	Vebe (seg)	Factor Compact.
0.35	0	21.3	0.733	0	11.2	0.820
0.40	13	8.5	0.813	61	3.5	0.964
0.45	64	3.2	0.976	172	1.0	0.985

Otra de las maneras de considerar la absorción de los AGR es emplear a los mismos en condición de saturados a superficie seca, de manera que no absorban parte del agua de mezclado. De este modo, los asentamientos obtenidos en los hormigones reciclados resultaron semejantes al de los hormigones convencionales de similares características elaborados con piedra partida granítica [Di Maio et al, 2001].

Evidentemente, el estado de humedad que presentan los AGR al momento de emplearlos en la elaboración de hormigones, influirá sobre el asentamiento de los mismos. Para verificar dicha influencia, se han realizado estudios variando el estado de humedad de los AGR (seco al aire, seco en estufa y saturado a superficie seca). Cuando los agregados fueron empleados en estado saturado no se observaron variaciones en el asentamiento medido en el tiempo en ninguna de las mezclas. Al emplear los agregados en estado seco debieron incrementar el contenido de agua de mezclado, en mayor medida cuanto mayor era el porcentaje de agregado natural reemplazado, lo cual hizo que los asentamientos iniciales resultaran en algunos casos algo diferentes [Poon et al, 2004]. Respecto a la variación del asentamiento en el tiempo, las mezclas con agregados naturales presentaron una leve pérdida de asentamiento en el tiempo, lo cual no ocurrió con las mezclas recicladas producto de un mayor contenido de agua inicial.

Un tercer modo de compensar la pérdida de asentamiento de las mezclas recicladas es mediante el empleo de aditivos plastificantes. Esta situación resulta de importancia en mezcla con baja razón a/c, donde el contenido de agua de mezclado se encuentra limitado, en cuyo caso podrá mantenerse constante la cantidad de agua a cambio de incrementar la dosis de aditivo con miras de lograr asentamientos similares a los de las mezclas convencionales [Hernández y Fornasier, 2005].

La mayor absorción que tienen los agregados reciclados puede ocasionar, en las mezclas con ellos elaboradas, una pérdida de trabajabilidad si la misma no es tenida en cuenta. En tal sentido, se podrá optar ya sea por presaturar los agregados con

anterioridad a su empleo o bien ajustar la cantidad de agua de mezclado en función de la absorción que presenten. En el caso de emplear aditivos plastificantes, y según el porcentaje de agregado reemplazado, podrá incrementarse la dosis de aditivo de manera que los asentamientos resulten similares.

2.3.1.2 Peso por unidad de volumen (PUV)

La menor densidad que presentan los AGR, debido a la mayor porosidad del mortero de cemento presente en sus partículas, como ya se mencionó, hace que el peso por unidad de volumen (PUV) en estado fresco de las mezclas recicladas sea inferior al de las elaboradas con agregados naturales. Este hecho fue confirmado por diferentes autores [*Hansen y Narud, 1983; Sri Ravindrarajah y Tam, 1985; ACI, 2002; Hernández y Fornasier, 2005*], quienes obtuvieron valores de PUV de 50 a 150 kg/m³ menores que en las mezclas convencionales.

Katz (2003) observó que el peso por unidad de volumen de los hormigones reciclados se encontraba en torno a los 2150 kg/m³, independientemente de la edad de trituración del hormigón que dio origen a los agregados reciclados. Indicó además que dicho comportamiento se debía a la menor densidad que presentan los agregados reciclados, ayudado por un mayor contenido de aire naturalmente incorporado.

2.3.1.3 Aire naturalmente incorporado

En algunos casos, han encontrado que el porcentaje de aire naturalmente incorporado durante la elaboración del hormigón no variaba de un hormigón convencional a uno reciclado [*Hansen y Narud, 1983*]. Otros autores en cambio concluyeron que dicho contenido de aire en los hormigones reciclados resulta superior al de los hormigones convencionales de similares características [*Di Maio et al, 2001; Hernández y Fornasier, 2005*], señalando incluso que la causa de por qué se produce dicho fenómeno no resulta del todo clara [*Katz, 2003*].

2.3.2 Estado Endurecido

La mayor rugosidad superficial que presentan los agregados reciclados con respecto a los naturales no sólo produce modificaciones de las mezclas en estado fresco, también puede influir sobre las propiedades en estado endurecido de los hormigones reciclados, debido a una potencial mejora de la zona de interfase mortero-agregado, con una menor porosidad y por tanto una mayor calidad de la misma.

2.3.2.1 Resistencia a compresión

Para distintas calidades de agregados gruesos reciclados (H-alta, M-media, L-baja), la resistencia a compresión de los hormigones reciclados (cuando el AGR proviene de un hormigón de igual nivel resistente al elaborado con dicho agregado), resulta del mismo orden que la de los hormigones convencionales (Tabla 2.6), mientras que cuando la calidad del hormigón triturado es inferior a la del nuevo hormigón la resistencia disminuye, en mayor medida cuanto menor es la razón a/c de este último. En tal sentido, *Hansen y Narud (1983)* indicaron que la resistencia a compresión del hormigón reciclado está muy controlada por la razón a/c del hormigón original que dio origen a los AGR, cuando los demás factores permanecen invariables. También informaron que se podrían elaborar hormigones reciclados de alta resistencia aunque el contenido de cemento se vería incrementado en comparación con un hormigón convencional.

Tabla 2.6 – Resistencia a compresión de hormigones reciclados en función de la calidad del agregado grueso reciclado.

[Hansen y Narud, 1983]

Serie	Resistencia a compresión (MPa)											
	H	H/H	H/M	H/L	M	M/H	M/M	M/L	L	L/H	L/M	L/L
1	56.4	61.2	49.3	34.6	34.4	35.1	33.0	26.9	13.8	14.8	14.5	13.4
2	61.2	60.7	-	-	36.0	-	36.2	-	14.5	-	-	13.6

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) por su parte, concluyeron que la resistencia de los hormigones reciclados resultó inferior a la de los hormigones convencionales, tanto cuando la misma se determinó sobre muestras cúbicas como cilíndricas (Tabla 2.7), lo cual fue atribuido a distintas causas:

- La porosidad total del hormigón reciclado es mayor que la del hormigón original;
- La resistencia del agregado grueso reciclado a las acciones mecánicas es significativamente menor que la del agregado granítico;
- La cantidad de áreas de unión frágiles en el hormigón reciclado es mayor que en el hormigón original.

En el caso particular de las mezclas de alta calidad, obtuvieron valores de resistencias algo superiores en los hormigones reciclados que en los hormigones convencionales cuando utilizaron probetas cilíndricas.

Tabla 2.7 – Resistencia a compresión en función de la calidad del agregado reciclado.

[Sri Ravindrarajah y Tam, 1985]

Mezclas	Calidad de la matriz	Calidad del agregado	Resistencia a Compresión (MPa)	
			Cúbica	Cilíndrica
H	Alta	-	42.5	26.5
HrH		Alta	40.5	33.0
HrM		Media	39.0	31.0
HrL		Baja	37.5	32.0
M	Media	-	37.5	27.5
MrH		Alta	29.5	22.0
MrM		Media	30.0	25.5
MrL		Baja	28.5	22.5
L	Baja	-	28.5	20.0
LrH		Alta	24.5	18.5
LrM		Media	27.0	20.5
LrL		Baja	24.0	19.5

Asimismo, y contrariamente a lo indicado en otras experiencias, informaron que la resistencia a compresión del hormigón reciclado está gobernada por la razón a/c del nuevo mortero y que la resistencia del hormigón a partir del cual se obtuvieron los agregados reciclados no tiene influencia.

Por otro lado, *Rasheeduzzafar (1984)* observó que para razones $a/c < 0.45$, la resistencia a compresión del hormigón reciclado era menor que la del hormigón convencional, en porcentajes de hasta un 30 %; mientras que para razones $a/c > 0.45$ la resistencia del hormigón reciclado era del mismo orden que la del hormigón de referencia (Figura 2.10). Asimismo indica que, para razones $a/c < 0.40$ la resistencia de los hormigones reciclados no se incrementa de manera significativa.

Este hecho fue corroborado por otros autores quienes concluyeron que no sólo los valores de resistencia a compresión del hormigón reciclado son menores a los del hormigón convencional sino que también la diferencia de resistencia entre el hormigón convencional y el reciclado disminuye a medida que la razón a/c se incrementa [Sri Ravindrarajah et al, 1988; Hernández y Fornasier, 2005].

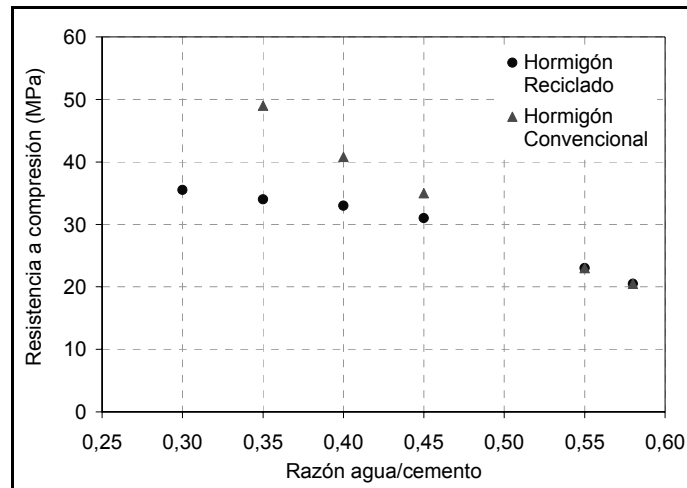


Figura 2.10 – Variación de la resistencia a compresión con la razón a/c para los hormigones reciclados y convencionales.

[Adaptado de: Rasheeduzzafar, 1984]

Correlaciones realizadas por diferentes autores entre la resistencia a compresión del hormigón original y la del hormigón reciclado muestran que la de éste último resulta un 10 % inferior a la del primero (Figura 2.11).

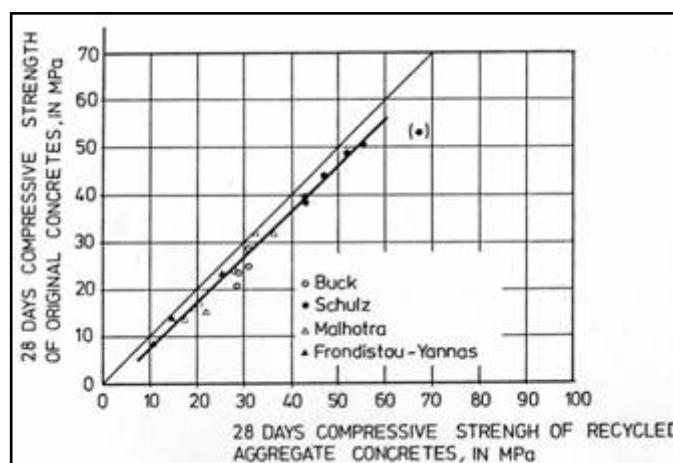


Figura 2.11 – Resistencia a compresión del hormigón reciclado en función de la resistencia del hormigón original.

[Hansen, 1986]

Los estudios anteriormente mencionados fueron realizados empleando un 100 % de AGR como reemplazo del AGN. Cuando dicho reemplazo se realizó de manera parcial, la resistencia a compresión de los hormigones reciclados se ve modificada. En tal sentido, diferentes autores han concluido que hasta un 30 % de reemplazo la resistencia a compresión del hormigón reciclado resulta semejante a la del hormigón convencional [Limbachiya et al, 2000; Gómez et al, 2001].

Con relación al empleo de la fracción fina reciclada, en algunos casos la han utilizado conjuntamente con la fracción gruesa reciclada, arrojando estos hormigones resistencias inferiores a la de los hormigones convencionales, y menores incluso que la de los hormigones elaborados sólo con agregado grueso reciclado [Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002].

Katz (2003) por otro lado, observó que no había diferencias en los valores de resistencia de los diferentes hormigones reciclados elaborados empleando la fracción fina y/o gruesa reciclada triturada a distintas edades, aunque sí de estos respecto al hormigón de referencia, alcanzando a los 28 días una resistencia del 76 % de dicho hormigón.

Contrariamente a los resultados obtenidos por otros autores, Vázquez y Barra (2002) señalaron que al disminuir la razón a/c siempre se consiguieron aumentos de resistencia en los hormigones reciclados, aunque no proporcionales a los hallados en hormigones convencionales. Además, indicaron que para un determinado nivel resistente el consumo de cemento de los hormigones reciclados era mayor que en los hormigones convencionales, y que para resistencias mayores dicha diferencia se ampliaba.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2002) elaboraron hormigones reciclados empleando agregados gruesos y finos reciclados provenientes de la trituración de diferentes estructuras demolidas, con edades de entre 2 y 7 años. El hormigón de dichas estructuras fue elaborado con piedra partida granítica, y en una de ellas se empleó basalto. El rango de resistencias de estos hormigones estaba comprendido entre 35 y 70 MPa. A partir de una misma dosificación, elaboraron hormigones reciclados con un 100 % de agregado grueso reciclado y arena natural, otros en los cuales reemplazaron la totalidad del agregado natural por agregado reciclado (fino y grueso), y hormigones convencionales. El comportamiento resistente de los hormigones reciclados resultó semejante al de los hormigones convencionales, con similares niveles de resistencia a todas las edades evaluadas (desde 1 hasta 90 días).

Como puede observarse, el comportamiento resistente en compresión que presentan los hormigones elaborados con agregado grueso reciclado, en reemplazo del agregado grueso natural hasta porcentajes del orden del 30 %, resulta semejante al del hormigón elaborado con agregados naturales. Para porcentajes de reemplazo superiores, los niveles de resistencia que pueden alcanzarse son muy variados, dependiendo fundamentalmente de la calidad del agregado reciclado.

Otra conclusión que surge de la bibliografía consultada está relacionada con la utilización de la fracción fina reciclada (partículas de tamaño < 4.75 mm), la cual al ser empleada conjuntamente con la fracción gruesa reciclada produce disminuciones de resistencia que pueden alcanzar el 50 % de la correspondiente a un hormigón convencional de similares características, para reemplazos del 100 % de arena natural por reciclada.

2.3.2.2 Resistencia a tracción

Diferentes investigadores que indicaron una disminución de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados, respecto a hormigones convencionales de similares características, llegaron a las mismas conclusiones al determinar su resistencia a tracción.

En el caso de *Sri Ravindrarajah et al (1987)* no solo obtuvieron una menor resistencia en los hormigones reciclados sino que también indicaron que la variación de la razón a/c tenía mayor influencia sobre la resistencia a compresión que sobre la resistencia a tracción, y que el hormigón reciclado se comportaba de un modo similar al hormigón convencional ante dicha variación de la razón a/c.

Del mismo modo, otros investigadores arribaron a las mismas conclusiones mencionadas anteriormente, indicando que la resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado mostraba una evolución similar con la edad respecto al hormigón convencional y que la misma disminuía a medida que el porcentaje de reemplazo del agregado era mayor [*Di Maio et al, 2001; Gómez et al, 2001; Gómez-Soberón, 2002*].

Respecto al tamaño máximo del agregado grueso, en los hormigones reciclados la resistencia a tracción no se ve afectada por una variación del mismo, mientras que un mayor tamaño máximo provocó un leve incremento de la misma en los hormigones convencionales [*Tavakoli y Soroushian, 1996*]. En este caso, los valores de resistencia a tracción que hallaron fueron, en mayor parte, superiores en los hormigones reciclados que en los convencionales.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2002) indicaron que la resistencia a tracción indirecta de los hormigones reciclados, elaborados en algunos casos con el 100 % de AGR y en otros con la totalidad de agregados reciclados (fino y grueso), resultó del mismo orden o levemente inferior a la de los hormigones convencionales elaborados con agregados naturales.

Al emplear agregados reciclados obtenidos de triturar hormigones a la edad de 1 día, *Katz (2003)* encontró que la resistencia a tracción de los hormigones reciclados era un 13 % superior a la de hormigones elaborados con agregados reciclados obtenidos de triturar hormigones a las edades de 3 y 28 días. Este hecho podría ser atribuido a una capacidad cementante latente por parte del cemento que se encuentra sin hidratar en las partículas de los agregados reciclados, debido a la temprana edad a la cual se trituró el hormigón.

La variación de la resistencia a tracción de los hormigones reciclados con la razón a/c o con la edad es similar a la que se produce en los hormigones convencionales. En cuanto al nivel resistente en tracción de los hormigones reciclados, el mismo puede resultar de magnitud inferior, igual o superior a la de los hormigones elaborados con agregados naturales, dependiendo de la calidad de los AGR.

2.3.2.3 Módulo de rotura

El comportamiento del hormigón reciclado en flexión resulta similar al que exhibe en tracción, presentando un menor módulo de rotura que el hormigón convencional. La variación de la razón a/c tiene más influencia sobre el ensayo de compresión que sobre éste ensayo y el comportamiento del hormigón reciclado frente a la variación de la razón a/c es comparable al de un hormigón convencional [*Sri Ravindrarajah et al, 1987*].

Hernández y Fornasier (2005) observaron que el módulo de rotura de los hormigones reciclados resultó inferior al de los hormigones convencionales; por otro lado, el menor módulo de rotura obtenido en uno de los hormigones reciclados se correspondía con un mayor valor de desgaste del AGR empleado en la elaboración de dicho hormigón.

Katz (2003) encontró que la relación entre las resistencias a flexión y a compresión de los hormigones reciclados estaba en el rango 16-23 %. Asimismo, el hormigón que contenía el agregado triturado a 1 día presentaba una resistencia a flexión similar a la del hormigón de referencia, y un 13 % superior que la de los demás hormigones reciclados.

2.3.2.4 Módulo de elasticidad estático

Sri Ravindrarajah y Tam (1985) encontraron que el módulo de elasticidad estático del hormigón reciclado (f_c : entre 20 y 30 MPa) era aproximadamente un 85 % del módulo del hormigón convencional (probeta cilíndrica) y del 70 % para probetas cúbicas. Esta

reducción en el valor del módulo estático fue atribuida al menor módulo que posee el AGR en comparación con el AGN.

Ajdukiewicz y Kliszczewicz (2002), por su parte, concluyeron que los hormigones reciclados (f'_c : 48 MPa) elaborados con agregados gruesos reciclados de diferentes orígenes presentaban valores del módulo de elasticidad estático entre un 8 y 11 % inferiores al módulo de los hormigones convencionales de igual resistencia.

Katz (2003) encontró que el módulo de elasticidad estático de los hormigones reciclados era menor a medida que la edad a la cual se había triturado el agregado reciclado era mayor. Los valores del módulo estático se encontraron entre el 50-63 % del módulo correspondiente al hormigón convencional, debido a la utilización conjunta de las fracciones gruesa y fina reciclada.

El agregado grueso reciclado, debido al mortero que presenta adherido, posee una mayor deformación que el agregado grueso natural. Este hecho producirá una disminución del módulo de elasticidad estático del hormigón reciclado respecto al del hormigón convencional, la cual será mayor cuanto más elevado sea el porcentaje de AGR utilizado.

Capítulo 3

NORMAS Y RECOMENDACIONES

Capítulo 3

NORMAS Y RECOMENDACIONES

3.1 INTRODUCCION

El reciclado de materiales de desecho para la elaboración de nuevos productos y materiales ha alcanzado en las últimas décadas una gran importancia, y el campo de la Ingeniería Civil no se ha mantenido al margen de ésta situación, ya que diversos motivos tales como la escasez de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente los problemas relacionados con el impacto ambiental que provocan los depósitos generados por los desechos de construcción y demolición, han llevado a la búsqueda de nuevas aplicaciones de estos materiales, resultando su uso como agregados una alternativa viable en la elaboración de nuevos hormigones.

En el caso de los agregados naturales, las propiedades dependen exclusivamente de las características de la roca original a partir de la cual se obtuvieron. Para los agregados reciclados (AR) esta situación es más compleja debido, como se mencionó en el Capítulo 2, a que la constitución que presentan los mismos hace que sus propiedades estén influenciadas no solamente por las de la roca sino además por las características del mortero que proviene del hormigón que dio origen a dichos agregados.

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 [Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002; Topcu y Sengel, 2004].

Debido a ello, la mayoría de los países altamente desarrollados cuentan con recomendaciones o códigos [Hansen, 1986; ACI, 2002] que establecen los porcentajes máximos en que dichos agregados reciclados pueden emplearse en reemplazo de los agregados naturales para la elaboración de nuevos hormigones, como así también las características y propiedades que los mismos deben cumplir para ello.

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

3.2 DEFINICIONES

A los efectos de familiarizarse con los términos habitualmente empleados en la temática planteada, de manera de tener una mejor comprensión del tema, se incluyen algunas definiciones de interés:

Agregado natural (AN): material granular, grueso o fino, obtenido de la trituración de rocas naturales o de yacimientos a cielo abierto.

Agregado reciclado (AR): material granular, grueso o fino, obtenido de la trituración de hormigones de desecho.

Hormigón convencional (HC): aquel elaborado en su totalidad con agregados naturales.

Hormigón reciclado (HR): aquel en cuya elaboración se ha reemplazado el agregado natural, grueso y/o fino, por agregado reciclado en forma parcial o total.

3.3 NORMAS Y/O REGLAMENTOS A UTILIZAR

Debe mencionarse que hasta el presente son pocos los países que cuentan con alguna legislación que permita la utilización de agregados reciclados provenientes de la trituración de hormigones de desecho, y más aún que tengan alguna recomendación o código que especifique las condiciones que el mismo debe cumplir cuando se emplea como reemplazo de los agregados naturales en la elaboración de nuevos hormigones.

A lo mencionado debe agregarse el hecho que los países que se enmarcan dentro de los comentarios mencionados en el párrafo anterior son Estados Unidos, Japón y otros pertenecientes a la Comunidad Europea, no existiendo en América Latina ninguno con dichas características.

Por tales motivos se han seleccionado un Código Alemán, una Recomendación editada por RILEM y un Proyecto de Recomendación para la utilización de hormigón reciclado en España. Estas son:

- » German Committee for Reinforced Concrete (DafStb) – Code: Concrete with Recycled Aggregates [*Grübl and Rühl, 1998*]
- » RILEM Recommendation: 121-DRG "Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates" [*RILEM Recommendation, 1994*]
- » Proyecto de Recomendación para la utilización de Hormigones Reciclados (España) [*Anejo 19, 2006*]

3.3.1 Aspectos relativos al modo en que las recomendaciones tratan el tema

El Código Alemán DafStb se encuentra dividido en dos secciones:

Hormigones: trata sobre las particularidades referidas a la producción y manejo del hormigón en el estado fresco, lo cual debe ser cumplimentado durante el proceso de elaboración del mismo.

Agregados: indica los requerimientos que deben cumplir los agregados reciclados obtenidos de hormigones de desecho, a los cuales se les exige que satisfagan aquellos 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, por su parte, 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 empleando 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”.

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

3.4 ANALISIS Y DISCUSION

En este punto, de manera semejante a lo señalado en las recomendaciones seleccionadas, se realiza un análisis de los requerimientos solicitados por cada una de ellas a los agregados reciclados, como así también a los hormigones elaborados con dichos agregados.

3.4.1 Requerimientos para los agregados reciclados

En la Tabla 3.1 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 de ensayo a emplear.

Con relación a las exigencias especificadas en la Recomendación RILEM, como ya se mencionó, las mismas están dadas en función de la clasificación que realiza de los agregados reciclados, a los que denomina Tipo I, Tipo II y Tipo III 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.

**Tabla 3.1 – Requerimientos para los agregados reciclados
según el Código Alemán DafStb.**

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

En la Tabla 3.2 se especifican, para cada uno de los tipos de agregados mencionados, los requisitos a cumplir como así también el método de evaluación a emplear.

En el caso del agregado Tipo III, además deberá cumplir con los siguientes requisitos adicionales: Contenido mínimo de agregado natural 80 % y contenido máximo de agregado Tipo I 10 %.

Tabla 3.2 – Requerimientos para los agregados reciclados según la Recomendación RILEM.

Requisitos obligatorios	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Método de evaluación
Densidad seca mín.(kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO 6783 y 7033
Absorción de agua máx. (% m/m)	20	10	3	ISO 6783 y 7033
Máx. contenido de material con Dsss<2200 kg/m ³ (% m/m)	--	10	10	ASTM C 123
Máx. contenido de material con Dsss<1800 kg/m ³ (% m/m)	10	1	1	ASTM C 123
Máx. contenido de material con Dsss<1000 kg/m ³ (% m/m y % v/v)	1	0.5	0.5	ASTM C 123
Máx. contenido de partículas extrañas (metal, vidrio, material suave, betún) (% 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 (< 0.063 mm) (% m/m)	3	2	2	prEN 933-1
Máx. contenido de arena (< 4 mm) (% m/m)	5	5	5	prEN 933-1
Máx. contenido de sulfatos (% m/m)	1	1	1	BS 812

En la Tabla 3.3 se indican las propiedades adicionales que deben cumplir los agregados reciclados según las normativas nacionales o las normas del European Committee for Standardization (CEN), especificadas en la recomendación RILEM.

Tabla 3.3 – Requisitos adicionales según la Recomendación RILEM.

Granulometría
Resistencia
Índice de forma
Valor de abrasión
Contenido de cloruro
Contenido de hierro y vanadio
Contenido de arcilla expansiva
Resistencia a congelación (si es diferente a los requisitos establecidos en la Tabla 3.7)

El Proyecto de Recomendación Española contempla los requisitos indicados en la Tabla 3.4 para los agregados reciclados, limitando los mismos a los obtenidos de la trituración de hormigones.

Tabla 3.4 – Requisitos exigidos a los agregados reciclados según el Proyecto de Recomendación Española.

Requisitos	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 (vidrio, plástico, metal, etc)	< 1 %	prEN 933-11
Cloruros	= AN	UNE 80-217:91
Sulfatos	= AN	UNE-EN 1744-1
Partículas con bajo peso específico	= AN	UNE-EN 1744-1
Partículas Blandas	= AN	UNE 7134:58
Terrones de arcilla (20 %)	< 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

Observando los requerimientos indicados en las Tablas 3.1 a 3.4, pueden hacerse las siguientes observaciones:

En primera instancia debe resaltarse que el Código Alemán DafStb y el Proyecto de 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 (Tabla 3.2); el equivalente a los establecidos en los dos textos señalados anteriormente es el denominado como Tipo II.

Otra distinción importante que surge de estas tres recomendaciones es que el Código Alemán DafStb es el único que permite el empleo de la fracción fina reciclada, previo cumplimiento de las mismas propiedades que las arenas naturales, en tanto que las otras dos se limitan a la fracción gruesa reciclada.

Refiriéndonos a la fracción fina, los tres textos seleccionados limitan para los agregados gruesos reciclados el contenido de partículas con tamaño menor a 4.75 mm (fracción arena) a un máximo de 5 %.

En cuanto a la densidad de los agregados reciclados, la Recomendación Española es la única que no indica nada al respecto, mientras que las dos restantes fijan el límite de 2000 kg/m^3 como valor mínimo.

Respecto al contenido de componentes minerales o desclasificados, según la denominación de cada recomendación, los valores límites establecidos difieren sustancialmente de una a otra. En tal sentido, el Código DafStb lo fija en 5 %, la recomendación Española permite hasta un 10 %, en tanto que la Recomendación RILEM los considera en función de la densidad del material limitándolo al 10 % para materiales con densidades $1800 < D_{ss} < 2200 \text{ kg/m}^3$, al 1 % para materiales con densidades $1000 < D_{ss} < 1800 \text{ kg/m}^3$ y al 0.5 % cuando la $D_{ss} < 1000 \text{ kg/m}^3$, siempre considerando el agregado Tipo II (Tabla 3.2).

En cuanto al contenido de materiales no minerales (madera, metales, plástico, etc.) el Código DafStb establece un límite del 0.2 %, la Recomendación RILEM fija el 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 en conjunto.

De lo indicado anteriormente respecto al contenido de impurezas de los agregados reciclados de hormigón, surge que el Código Alemán DafStb es el más conservador de los tres, en tanto que la Recomendación Española es la que menos restricciones impone a las cantidades de materiales extraños.

Otro de los parámetros importantes al momento de evaluar los agregados reciclados lo constituye la absorción de agua que presenten los mismos. En tal sentido, el Código DafStb fija valores máximos de absorción del 10 % para las partículas de tamaño $> 2 \text{ mm}$ y del 15 % para las de tamaño $\leq 2 \text{ mm}$. 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.

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 (Tabla 3.3).

La Recomendación Española por su parte indica iguales contenidos de partículas blandas y de bajo peso específico para los agregados reciclados y naturales.

Con relación a la durabilidad en sulfato de magnesio, la Recomendación Española fija el valor de pérdida igual al del agregado natural (12 %).

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 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.

Respecto al contenido de contaminantes, ambas recomendaciones 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, mientras que en la segunda, ambos límites se toman igual al de los agregados naturales.

El Código Alemán DafStb resulta, en este sentido, el más completo al momento de evaluar los agregados reciclados desde el punto de vista de los contaminantes, ya que limita tanto los contenidos de cloruros y sulfatos como así también los de otros elementos como arsénico, cromo, mercurio, etc. (Tabla 3.1)

3.4.2 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 material reciclado a emplear como así también el nivel resistente del hormigón y el destino del mismo.

En tal sentido, el Código Alemán DafStb no impone ninguna restricción 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 3.5).

Tabla 3.5 – Campo de aplicación y restricciones concernientes a los hormigones conteniendo agregados reciclados, según el Código DafStb.

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	

Estas restricciones no permiten la utilización de material potencialmente reactivo para usos externos, aún cuando se empleen cementos de características especiales. Sin embargo, la recomendación permite, en general para hormigón armado, la adición de hasta un 5 % en masa de agregado reciclado.

En lo que hace a las exigencias requeridas según este Código, los hormigones elaborados con agregados reciclados tienen que cumplir con los mismos requerimientos que los hormigones elaborados con agregados naturales de densidad normal.

El contenido máximo de agregado reciclado que puede ser utilizado según éste Código 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 3.6.

Tabla 3.6 – Máxima cantidad de agregado reciclado referido a:
a) la cantidad total de agregado; b) 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					
Componentes Impermeables al Agua					
Componentes con Alta resistencia al Congelamiento		20	30	0	
Componentes con Moderada resistencia al Ataque Químico					

¹ De acuerdo con DIN 1045.

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 como representativa del 90 % de la absorción a 24 horas. El conocimiento de ambos parámetros permitirá definir la “razón 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. En la Figura 3.1 se muestra la relación entre la dosis de superplastificante (para un cierto tipo) y el cambio en el valor del extendido.

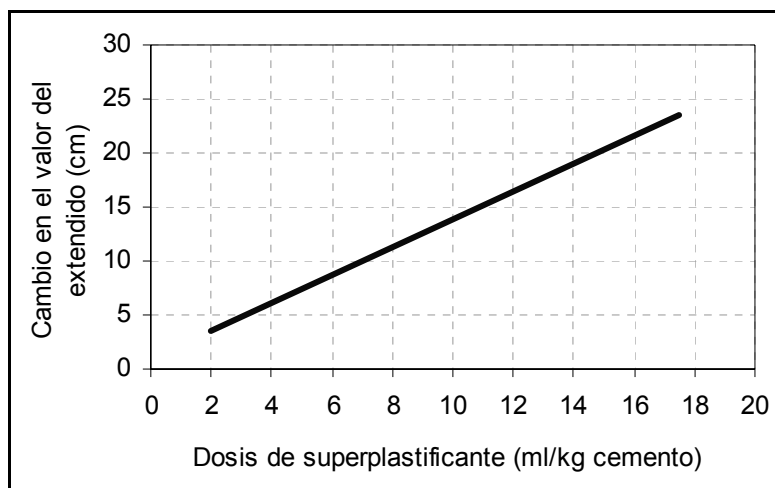


Figura 3.1 – Dosis de superplastificante en función del extendido.

[Adaptado de Grübl and Rühl, 1998]

Este Código asegura que la consistencia especificada en el contrato será lograda en la obra. 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 reciclado en función del tipo de agregado reciclado utilizado. Para el caso que nos interesa, donde el agregado reciclado se emplea en forma conjunta con agregados naturales (Tipo III), dicha recomendación no impone límites a la clase resistente del hormigón elaborado con dicho agregado (Tabla 3.7), pudiéndolo emplear en hormigón simple o armado. Debe recordarse sin embargo que esta recomendación limita el contenido de agregado reciclado al 20 %. Asimismo, en dicha tabla se indican los

ensayos adicionales que deben realizarse al hormigón en función de la clase de exposición a que estará expuesto.

Tabla 3.7 – Restricción al empleo de hormigones reciclados, según el tipo de agregado reciclado y clase de exposición.

Requisitos	AR Tipo I	AR Tipo II	AR Tipo III
Máx. clase resistente	H 16/20 ^a	H 50/60	ningún límite
Ensayo adicional Exposición clase 1 ^b	no	no	no
Ensayo adicional Exposición clases 2a, 4a	Expansión álcali sílice (clase 2a) No permitido su uso en clase 4a	Expansión álcali-sílice	Expansión álcali-sílice
Ensayo adicional Exposición clases 2b, 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

^b Conforme ENV 206

Los requisitos adicionales indicados en la tabla anterior son de importancia para las exposiciones clase 2, 3 y 4 (carbonatación e ingreso de cloruros), 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 3.8.

Tabla 3.8 – Criterios de durabilidad para los hormigones reciclados según la 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	Máx. pérdida de peso < 500 g/m ²

En cuanto a lo estipulado en el Proyecto de la Recomendación Española, debe mencionarse que el mismo 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 la Recomendación RILEM, este Proyecto limita el contenido de agregado grueso reciclado a utilizar, permitiendo en este caso 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.

Este Proyecto de Recomendación introduce el tema de los recubrimientos a considerar en el proyecto estructural, estableciendo que pueden emplearse los mismos que en los hormigones convencionales cuando el porcentaje de reemplazo se encuentre debajo del 20 %. Para porcentajes mayores, podrán mantenerse los mismos recubrimientos previa verificación mediante ensayos que garanticen una durabilidad similar a la del hormigón convencional.

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 ambientes con temperaturas inferiores a los 0 °C, en los cuales exista la posibilidad de daño por efecto de congelación y deshielo, esta recomendación indica que el agregado reciclado deberá cumplir con la especificación relativa a la estabilidad en solución de sulfato de sodio, y que para reemplazos superiores al 20 % deberán realizarse ensayos específicos.

Para exposiciones en ambientes donde el hormigón se encuentre expuesto al ataque por sulfatos o al 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 Angeles” (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 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 embebidas en el mismo. En tal sentido, este proyecto de recomendación indica que cuando el empleo de los agregados reciclados es inferior al 20 %, el comportamiento de los hormigones reciclados es similar al de los hormigones convencionales. Para porcentaje mayores la protección frente a la corrosión es inferior y se deberán realizar los ensayos correspondientes en cada caso.

Otro de los puntos a los cuales se refieren las recomendaciones mencionadas, es al del cálculo de las estructuras y elementos de hormigón. Al respecto, el Código Alemán DafStb establece que los distintos componentes del edificio pueden ser diseñados con los mismos valores característicos 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 resultantes del uso de agregados reciclados tienen que ser evaluadas mediante los ensayos correspondientes.

De igual modo, la Recomendación RILEM indica que para el hormigón elaborado con agregados reciclados se pueden emplear 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 reciclado multiplicando los valores expuestos en el prENV 1992-1-1 para el hormigón convencional por los coeficientes dados en la Tabla 3.9. Cuando sean necesarios datos más precisos (por ejemplo cuando las deformaciones son de gran importancia) es necesario realizar los ensayos correspondientes.

Tabla 3.9 – Coeficientes a aplicar para la estimación de las propiedades de los hormigones reciclados, según la Recomendación RILEM.

Valores de diseño	AR Tipo I	AR Tipo II	AR Tipo III
Resistencia a tracción (f_{ctm})	1	1	1
Módulo de elasticidad (E_{cm})	0.65	0.8	1
Coeficiente de Creep ($\phi(\infty, t_0)$)	1	1	1
Contracción por secado (ϵ_{cs0})	2	1.5	1

Para el diseño de una estructura, puede ser importante conocer más parámetros que los indicados en la Tabla 3.9, para lo cual se recomienda el uso de los procedimientos establecidos en el Eurocódigo 2 para hormigones livianos.

El Proyecto de 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 de elasticidad estático, la contracción por secado y la fluencia.

En el caso de utilizar porcentajes superiores al indicado se recomienda la realización de estudios específicos para, por ejemplo, definir correctamente el diagrama de cálculo. Respecto al módulo de elasticidad, indica de manera orientativa que para un 100 % de reemplazo el valor de dicho módulo 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 1.5 y 1.25 veces la correspondiente a un hormigón convencional respectivamente.

Capítulo 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Capítulo 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCION

En base a lo indicado en la bibliografía consultada respecto a las características que presentan los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho, sumado a la escasa experiencia existente a nivel nacional al momento de elaborar el plan de trabajo, es que se decidió estudiar las principales propiedades físicas y mecánicas de diferentes muestras de agregados gruesos reciclados en forma similar a como se realiza sobre los agregados gruesos naturales.

Los estudios que forman parte de este trabajo de tesis tienen como principal objetivo evaluar diferentes propiedades de los agregados gruesos reciclados (AGR) obtenidos de la trituración de hormigones de desecho, con el fin de emplearlos en reemplazo del agregado grueso natural (AGN) en la elaboración de nuevos hormigones de características resistentes de tipo estructural. Además, se evalúan diferentes propiedades de los hormigones con ellos elaborados, tanto cuando se encuentran en estado fresco como endurecido.

La metodología de trabajo estuvo dividida en dos etapas:

Primera etapa: consistió en el estudio de diferentes propiedades físico-mecánicas de los AGR, las que fueron comparadas con las determinadas sobre un AGN de tipo granítico. Estas propiedades fueron evaluadas, en primera instancia, sobre diferentes muestras de AGR obtenidas de la trituración de hormigones de desecho de características desconocidas y variadas (Serie A), a lo largo de un período de tiempo determinado, lo cual permitió determinar la variación que podían experimentar las mismas como consecuencia de triturar hormigones de distinto origen y características. En segundo término, se procedió a la evaluación de las mismas propiedades que en el caso anterior pero sobre muestras de AGR obtenidos de la trituración sucesiva de hormigones conocidos, realizando ciclos de reciclados (Serie B), a fin de determinar la influencia que

tiene la presencia del mortero de cemento adherido a las partículas de agregado sobre las distintas propiedades evaluadas.

Segunda etapa: se estudiaron las propiedades en estado fresco y diferentes propiedades físicas y mecánicas en estado endurecido de hormigones reciclados (HR) de distintas razones agua/cemento (a/c), en los cuales el AGN fue reemplazado por un 75 % en volumen de AGR. Los resultados fueron comparados con los obtenidos sobre hormigones convencionales (HC) de similares características (igual a/c) elaborados en su totalidad con agregados naturales.

4.2 PRIMERA ETAPA:

AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

La metodología de trabajo adoptada para la Serie A pretendió simular lo que sucede en los centros de reciclaje, donde llegan y se trituran hormigones de orígenes diferentes y desconocidos, con el objetivo de estudiar la posible variación en las propiedades de los AGR como consecuencia de ello.

Como se menciona en el Capítulo 2, las propiedades de los agregados reciclados (AR) dependen tanto de las propiedades de la roca original como de las características de los hormigones a partir de los cuales fueron obtenidos. Por tal motivo, al momento de triturar los hormigones de desecho, se tuvo especial cuidado en que los mismos hubieran sido elaborados con agregados naturales de un mismo tipo, en este caso piedra partida granítica. Además, se descartaron todos aquellos hormigones que por cualquier circunstancia pudieran estar contaminados desde cualquier punto de vista.

Durante un período de nueve meses, se generaron agregados reciclados a partir de la trituración de hormigones de desecho provenientes de orígenes variados, principalmente de muestras moldeadas en obra para control de calidad y de elementos de hormigón premoldeado, y en menor medida de muestras correspondientes a estudios realizados en otras líneas de investigación que se desarrollan en el LEMIT. En los casos en que las muestras involucradas habían sido ensayadas a compresión, se procedió a eliminar el encabezado de azufre previo a su trituración.

En el caso de la Serie B, el objetivo fue estudiar la influencia que tiene la presencia del mortero de cemento presente en los AGR sobre las distintas propiedades

físicas y mecánicas sobre ellos evaluadas. Para ello se elaboró un hormigón convencional (HC), empleando en su totalidad agregados naturales, el cual luego del período de curado fue evaluado y posteriormente triturado obteniéndose un agregado grueso reciclado que podría denominarse de primer ciclo (AGR-01). Este AGR fue utilizado en la elaboración de un primer hormigón reciclado (HR-01) de iguales proporciones que el HC pero reemplazando el AGN por el AGR-01 en un 75 % en volumen. Este hormigón fue curado, evaluado y posteriormente triturado de manera de obtener un AGR de segunda generación (AGR-02). Este nuevo agregado reciclado fue empleado en la elaboración de un segundo hormigón reciclado (HR-02), de iguales proporciones al HR-01. Dicho procedimiento se reiteró hasta completar cinco ciclos de reciclado, lo cual se esquematiza en la Figura 4.1.

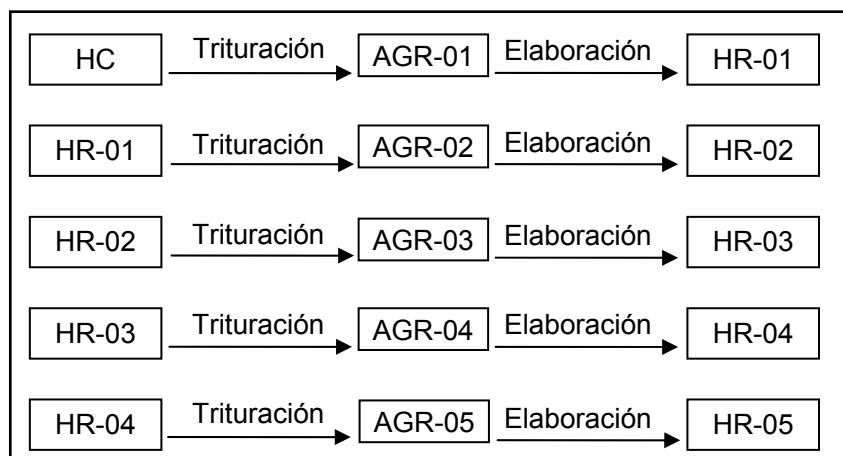


Figura 4.1 – Procedimiento de obtención de los sucesivos agregados gruesos reciclados.

En ambas series, la obtención de los AR se realizó mediante el empleo de una trituradora de mandíbulas (Figura 4.2) lográndose muestras de diferentes tamaños.

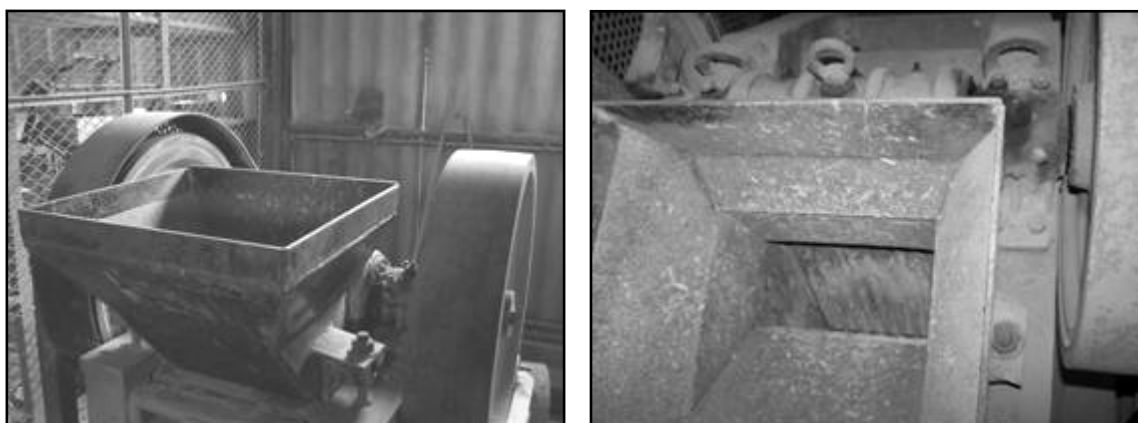


Figura 4.2 – Trituradora de mandíbulas.

Los AR que componen la Serie A fueron acopiados a la intemperie de manera semejante a lo que ocurre con los agregados naturales (Figura 4.3). Las extracciones de las muestras se realizaron durante el mismo período de nueve meses en el cual se generaron los agregados reciclados, previa homogeneización del acopio, disminuyendo de éste modo las posibilidades de obtener muestras de similar composición debido a la permanente renovación del mismo. Se obtuvieron un total de doce muestras de agregados. Los AR de la Serie B, por su parte, fueron inmediatamente utilizados para la elaboración de los nuevos hormigones.



Figura 4.3 – Acopio de agregados reciclados de la Serie A.

Las muestras de AR correspondientes a ambas series, previamente a su evaluación y uso fueron tamizadas tomando para estos estudios la fracción que pasó el tamiz IRAM 25 mm y quedó retenido en el tamiz IRAM 4.75 mm (Nº 4), descartando la fracción fina, es decir, la que pasaba este último tamiz. Dicha decisión fue tomada en base a lo señalado en la bibliografía internacional, la cual indica que el empleo del agregado fino reciclado para la elaboración de hormigones es el que mayores inconvenientes presenta, debido a la alta capacidad de absorción de agua y al elevado tenor de contaminantes y material fino que el mismo posee [*Hansen, 1986*].

De manera semejante a lo indicado en la bibliografía [*Vázquez y Barra, 2002*], en estos estudios se comprobó también que las partículas que componen los AGR pueden estar compuestas sólo por roca natural, por agregado natural y mortero del viejo hormigón adherido en proporciones variables o únicamente por mortero. En la Figura 4.4 se presenta una fotografía de una de las muestras resultante de realizar las operaciones de trituración y tamizado como se describió anteriormente, y en la cual puede observarse la composición de las partículas.



Figura 4.4 – Muestra de AGR estudiado.

A cada una de las muestras de AGR seleccionadas para estos estudios, las doce de la Serie A y las cinco de la Serie B, se les determinaron distintas propiedades físico-mecánicas de manera de poder caracterizarlas y compararlas con las determinadas sobre los AGN de uso habitual en la región.

Las diferentes propiedades evaluadas sobre los AGR y AGN fueron:

- + Granulometría / Módulo de Finura (Norma IRAM 1505)
- + Densidad (Norma IRAM 1533)
- + Absorción de agua (Norma IRAM 1533)
- + Resistencia al desgaste con la máquina “Los Angeles” (Norma IRAM 1532)
- + Material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm (Norma IRAM 1540)
- + Índices de lajas y elongación (Norma IRAM 1687)
- + Ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio (Norma IRAM 1525)

4.3 SEGUNDA ETAPA:

HORMIGONES RECICLADOS

En estudios previos realizados en el LEMIT sobre hormigones de distintas razones agua/cemento, elaborados con agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural en porcentajes del 25, 50, 75 y 100 % en volumen, se llegó a la conclusión que hasta reemplazos del 75 % el nivel resistente de los mismos era semejante al de los hormigones convencionales de similares características [Di Maio et al, 2002]. En dicho estudio, los agregados reciclados se obtuvieron de la trituración de un hormigón (a/c: 0.50) elaborado previamente en laboratorio.

A partir de los resultados mencionados se adoptaron las premisas para el desarrollo de los estudios y tareas que forman parte de la segunda etapa del trabajo de tesis, las cuales consistieron en la adopción de un único porcentaje de reemplazo (75 % en volumen) y en la utilización de agregados gruesos reciclados generados según se describió en el punto anterior, los cuales fueron agrupados en las Series A y B.

Para el empleo de los agregados reciclados que componen la Serie A se adoptaron tres dosificaciones, con razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 para la elaboración de las diferentes mezclas. Se elaboraron hormigones convencionales (HC) utilizando en su totalidad agregados naturales, los cuales fueron empleados como referencia al momento de evaluar las distintas propiedades, y diferentes hormigones reciclados (HR-A) empleando los agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural (piedra partida granítica) en el porcentaje antes indicado, manteniendo constante las proporciones de los demás materiales.

En el caso de los agregados AGR de la Serie B, se adoptó una única dosificación con razón a/c 0.50 para la elaboración del hormigón convencional (HC), la cual fue mantenida para la elaboración de los distintos hormigones reciclados (HR-01 al HR-05), reemplazando el agregado grueso natural también en un 75 % en volumen por el correspondiente agregado grueso reciclado según se indicó en la Figura 4.1.

Los demás materiales utilizados en la elaboración de los distintos hormigones convencionales y reciclados fueron cemento portland compuesto (CPC-40), dos arenas silíceas naturales con módulos de finura 1.66 y 2.72, y piedras partidas graníticas de dos tamaños nominales, 6-20 y 10-30.

Con cada una de las mezclas recicladas y convencionales elaboradas, tanto las de la Serie A como de la B, se moldearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm y prismáticas de 150 x 150 x 900 mm para la realización de diferentes ensayos de modo de caracterizar a los hormigones HR y poder cuantificar su comportamiento de manera comparativa con el de los hormigones HC. El moldeo de las muestras se realizó siguiendo los lineamientos indicados en la Norma IRAM 1534, mediante compactación manual con varilla.

Las muestras fueron desmoldadas a las 24 horas y colocadas en cámara con temperatura y humedad controlada ($T: 23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$; HR: 95 %) hasta la edad de 28 días [Norma IRAM 1534].

Capítulo 5

Primera Etapa:

**AGREGADOS GRUESOS
RECICLADOS**

Capítulo 5

Primera Etapa:

AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

5.1 INTRODUCCION

Como se mencionó en el Capítulo 4, las propiedades se determinaron sobre la fracción de agregado grueso que paso el tamiz IRAM 25 mm y quedó retenida sobre el tamiz IRAM 4.75 mm (Nº 4). Las distintas propiedades evaluadas sobre los AGR y AGN fueron:

- + Granulometría / Módulo de Finura
- + Densidad
- + Absorción de agua
- + Resistencia al desgaste con la máquina “Los Angeles”
- + Material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm
- + Indices de lajas y elongación
- + Ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio

5.2 GRANULOMETRIA / MODULO DE FINURA

Considerando el tamaño máximo obtenido en el proceso de trituración, el análisis granulométrico de los AGR que componen ambas series, A y B, se realizó empleando los tamices IRAM 25 mm (1”), 19 mm (3/4”), 12.7 mm (1/2”), 9.5 mm (3/8”) y 4.75 mm (Nº 4) utilizados para los agregados gruesos naturales [*Normas IRAM 1501 e IRAM 1505*].

Las curvas granulométricas determinadas en cada una de las doce muestras de AGR de la Serie A se presentan en la Figura 5.1. Los porcentajes pasantes acumulados correspondientes a cada una de dichas curvas se presentan en la Tabla I.1 del Anexo I.

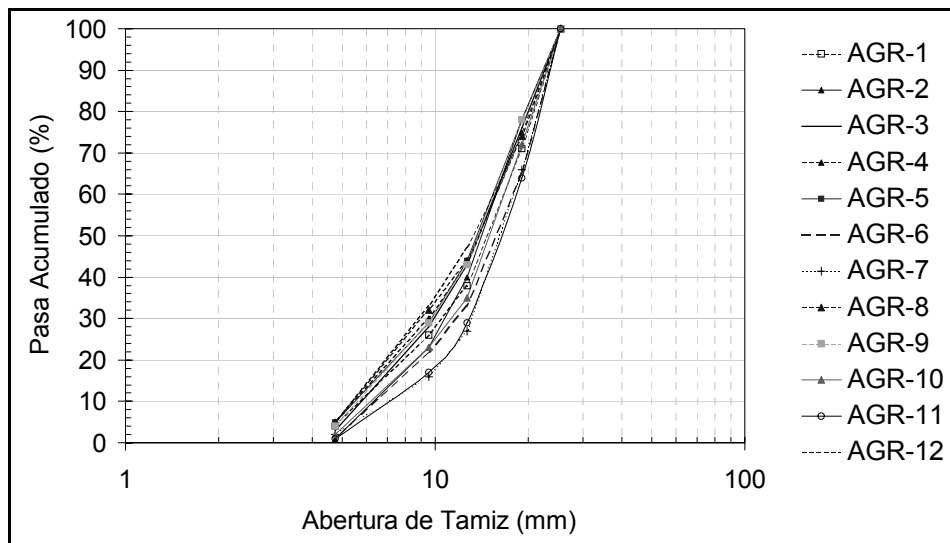


Figura 5.1 – Curvas granulométricas de los AGR de la Serie A.

Puede observarse que las distintas curvas granulométricas se encuentran próximas unas de otras, resultando muy difícil la diferenciación entre cada una de ellas. Este hecho está indicando que la distribución de partículas que se obtienen al triturar hormigones de diferentes características, empleando una misma trituradora y un mismo procedimiento, resultó independiente de la calidad de los mismos.

A partir de las curvas granulométricas mostradas en la figura anterior se definieron los límites superior e inferior correspondientes a las mismas. En la Figura 5.2 se presentan los límites granulométricos establecidos en el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón [CIRSOC 201] y en la Norma IRAM 1627, para agregados gruesos naturales de tamaño máximo nominal de 25.4 mm, junto con los límites definidos para los AGR a partir de las muestras de la Serie A.

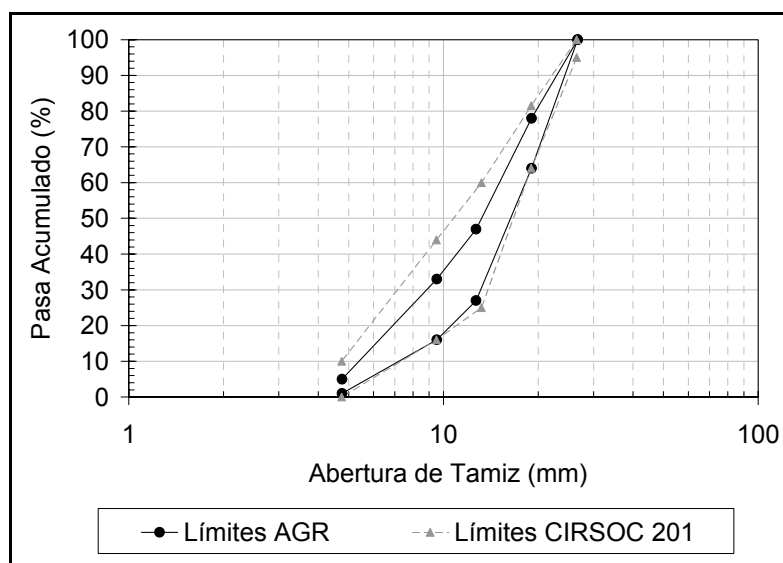


Figura 5.2 – Límites granulométricos de los AGR de la Serie A y los establecidos por el CIRSOC 201 para agregados gruesos naturales.

Puede observarse que los límites determinados para los AGR se ubican perfectamente dentro de los establecidos para los agregados gruesos naturales de igual tamaño máximo. Este hecho permite afirmar que la obtención de agregados gruesos reciclados con una gradación apta para su uso en la elaboración de hormigones, a partir de la trituración de hormigones de desecho por medio de una trituradora de mandíbulas en una sola pasada, es técnicamente factible e independiente de la calidad de los hormigones triturados.

Debido a que el módulo de finura de un agregado está directamente relacionado con su granulometría, el determinado sobre cada una de las muestras de AGR que componen la mencionada Serie A, se encuentran dentro del rango de valores habituales para este tamaño máximo, con un valor medio de 6.97. En la Figura 5.3 se presentan los valores de los módulos de finura (ver Tabla I.3 del Anexo I) determinados en cada una de las doce muestras de AGR de dicha serie, pudiéndose observar que la variación que se produce es poco significativa.

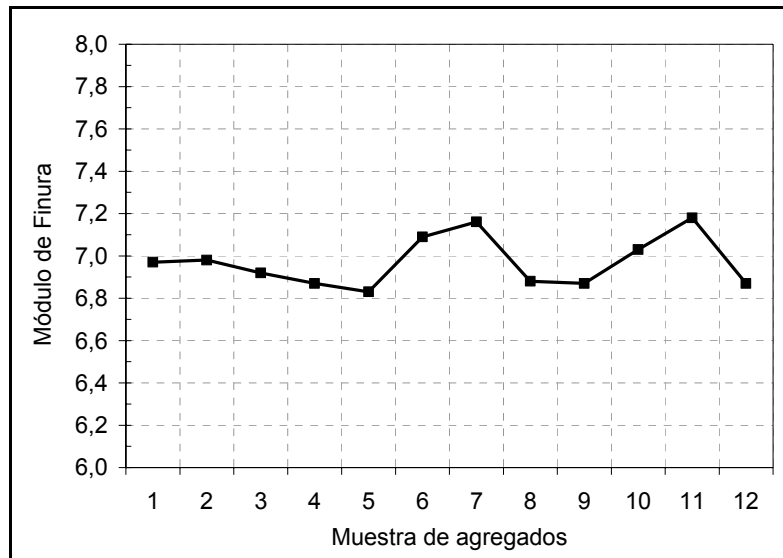


Figura 5.3 – Variación del módulo de finura de los AGR de la Serie A.

Para el caso de la Serie B, las curvas granulométricas correspondientes a cada una de las cinco muestras de AGR resultantes de los cinco ciclos de reciclado se presentan en la Figura 5.4. Los valores determinados se indican en la Tabla I.2 del Anexo I.

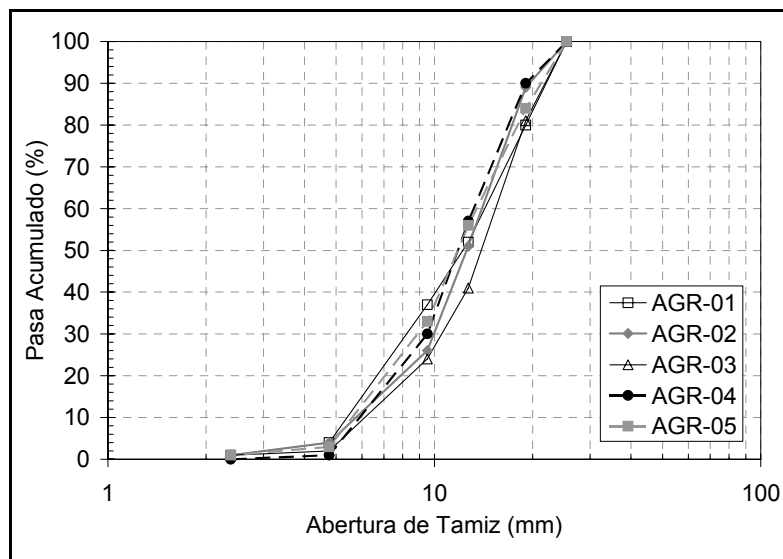


Figura 5.4 – Granulometría de los AGR de la Serie B.

Puede observarse que los diferentes AGR obtenidos en los cinco ciclos de reciclado (Serie B) presentan granulometrías similares, lo cual estaría indicando que el contenido de mortero del hormigón no tiene una influencia importante sobre la granulometría del agregado resultante.

5.3 DENSIDAD

La determinación de la densidad relativa aparente de los AGR estudiados, correspondientes a ambas Series A y B, se realizó empleando la metodología establecida para los agregados gruesos naturales [Norma IRAM 1533].

En la Figura 5.5 se presentan los valores de densidad en condición de saturado y superficie seca (Dsss) determinados sobre las doce muestras de AGR que componen la denominada Serie A. (ver Tabla I.3 del Anexo I)

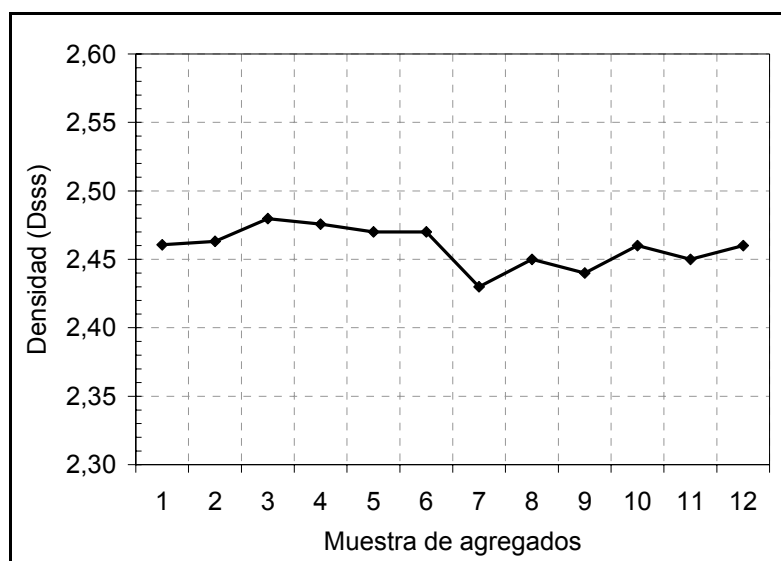


Figura 5.5 – Variación de la densidad de los AGR de la Serie A.

Puede observarse que la variación obtenida en esta propiedad a lo largo de los doce muestreos realizados resulta muy poco significativa, a pesar de que las mismas resultaron, como ya se mencionó, de la trituración de diferentes hormigones de desecho cuyas características se desconocían. Los valores de densidad estuvieron en el rango 2.43 - 2.48, con un valor medio de 2.46, los cuales resultaron aproximadamente un 9 % inferiores a la densidad del agregado granítico natural (~ 2.70). Este hecho es atribuido a la mayor porosidad que posee el mortero de cemento proveniente del hormigón original, el cual forma parte de los agregados gruesos reciclados como ya fue mencionado en los capítulos anteriores.

En el caso de los AGR obtenidos de los cinco ciclos de reciclado, los valores de densidad determinados también en estado de saturado y superficie seca (Dsss) se

presentan en la Figura 5.6, junto con el obtenido en el agregado natural (AN) de tipo granítico. (Ver Tabla I.4 del Anexo I)

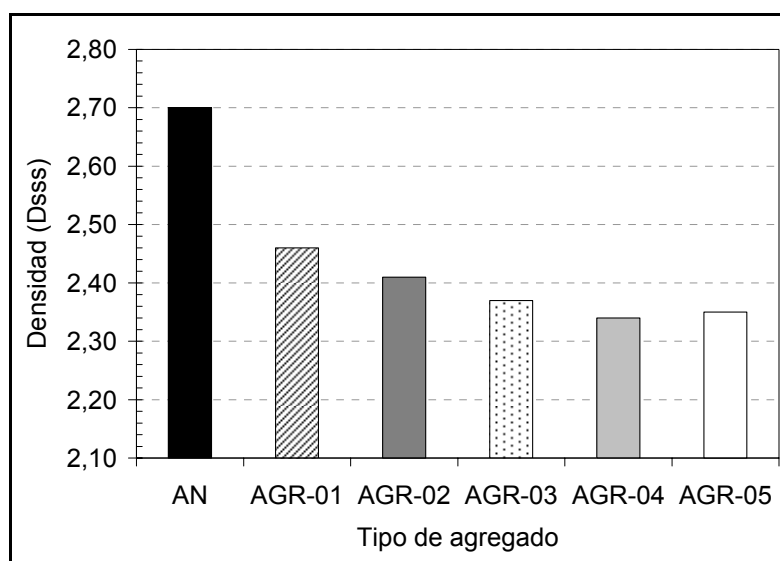


Figura 5.6 – Densidad de los AGR obtenidos de la Serie B.

Se observa una importante disminución de la densidad (~ 9 %) entre el AGR-01 respecto al agregado natural, similar a la obtenida en los AGR de la Serie A analizados anteriormente. A partir del segundo ciclo de reciclado las densidades disminuyen en un 11 % (AGR-02), 12 % (AGR-03) y 13 % (AGR-04 y 05) con relación a la del agregado natural.

Este hecho es atribuido al aumento en el contenido de mortero que presenta el agregado reciclado conforme se avanza en el número de ciclos de reciclado, ya que en cada nuevo hormigón reciclado elaborado se introduce un agregado que posee mayor contenido de mortero y menor cantidad de piedra natural.

5.4 ABSORCION DE AGUA

Como fue mencionado en capítulos anteriores, la absorción de agua que presentan los agregados gruesos reciclados es la propiedad con una diferencia más significativa con relación a la de los agregados gruesos naturales. La determinación de esta propiedad se realizó también siguiendo la Norma IRAM 1533, evaluando la capacidad de absorción de agua en 24 hs.

Los valores de absorción obtenidos sobre las muestras de AGR de la Serie A se presentan en la Figura 5.7. (Ver Tabla I.3 del Anexo I)

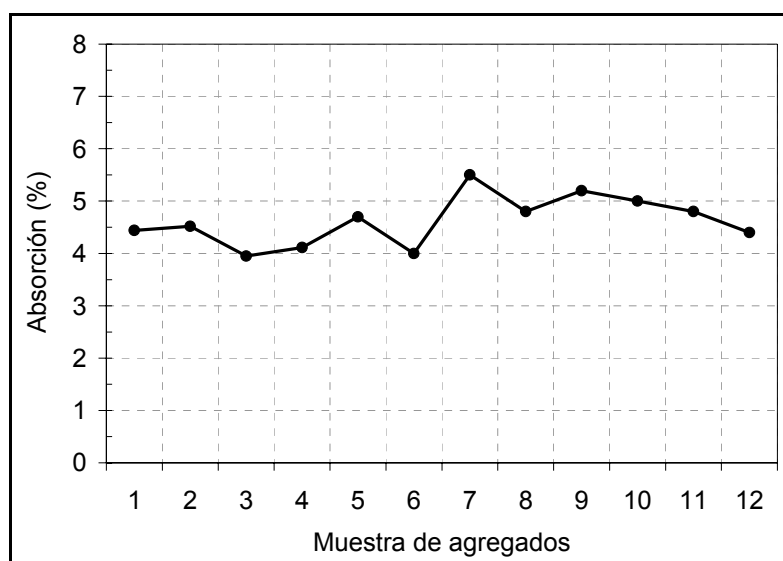


Figura 5.7 – Variación de la absorción de agua de los AGR de la Serie A.

Puede observarse que las absorciones que presentan los AGR se encuentran próximas al 5 %, las cuales son un orden de magnitud superior a la del agregado natural granítico, o dicho de otra manera, son 11 veces superiores.

Este incremento en la capacidad de absorción de agua que presentan los AGR es atribuido, al igual que en el caso de la densidad, al mortero que los mismos poseen en su constitución.

Respecto a la variación que presenta la absorción en las doce muestras seleccionadas, se observa que la misma es más significativa que la presentada por la densidad, aunque menos importante de la que podría esperarse teniendo en cuenta la procedencia de dichos agregados. Los valores de absorción se encuentran entre un 3.9 y 5.5 %.

Observando las Figuras 5.5 y 5.7 puede apreciarse que la muestra 3 posee el mayor valor de densidad y la menor absorción, mientras que la muestra 7 presenta la menor densidad y el mayor valor de absorción. Este hecho permite verificar la relación inversa entre la densidad (D_{ss}) y la absorción de agua (A_b), tal como se menciona en la bibliografía [Hansen, 1986], aunque el número de datos con los que se cuenta sea bajo.

En la Figura 5.8 se presenta un gráfico de dispersión Absorción-Densidad en el cual se incluye una curva de tendencia del tipo lineal, junto con la ecuación de ajuste de la misma y el coeficiente de determinación muestral.

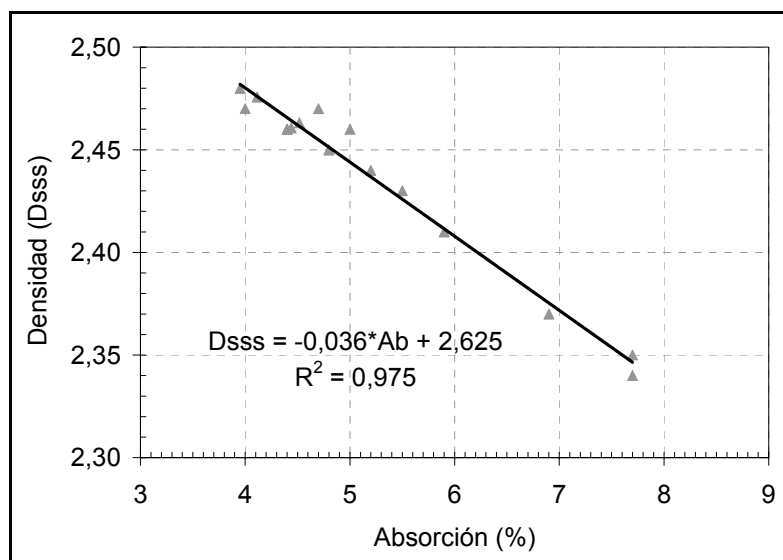


Figura 5.8 – Relación entre la absorción de agua y la densidad de los AGR.

Los valores de absorción obtenidos en cada uno de los agregados gruesos reciclados derivados de los cinco ciclos de reciclado (Serie B), como así también sobre el agregado grueso natural, se presentan en la Figura 5.9. (Ver Tabla I.4 del Anexo I)

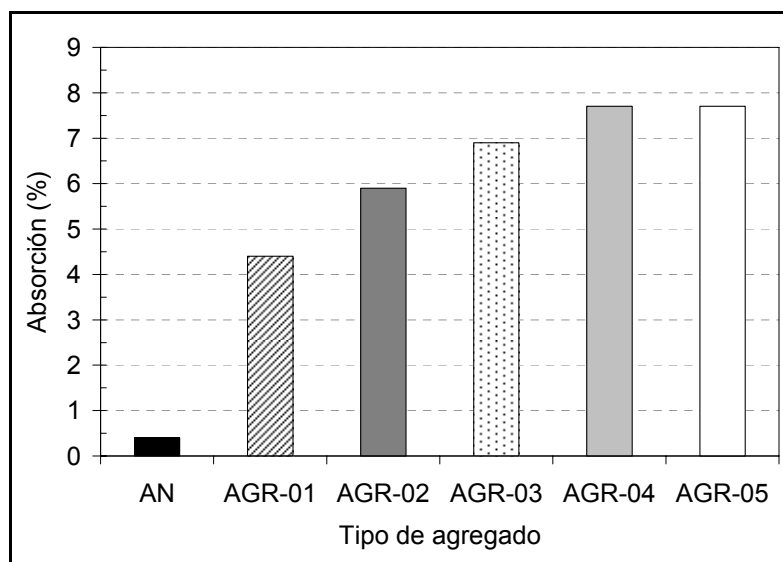


Figura 5.9 – Absorción de agua de los AGR de la Serie B.

Puede observarse que el agregado reciclado obtenido del primer ciclo (AGR-01) presenta un valor de absorción que se encuentra dentro del rango de absorciones en que

se ubicaron los AGR de la Serie A. A partir del segundo ciclo (AGR-02), las absorciones continúan aumentando aunque las diferencias van disminuyendo al aumentar el número de ciclos realizados.

En tal sentido puede observarse que para el AGR-01 la absorción es 11 veces superior a la del AN, para el AGR-02 es 15 veces y para los restantes resulta 17, 19 y 19 veces superior.

Este comportamiento es también atribuido al mayor contenido de mortero que presentan los AGR de la Serie B a medida que se produce un mayor número de ciclos de reciclado, permitiendo verificar la disminución observada en los valores de densidad de dichos agregados (Ver Figura 5.6).

5.5 RESISTENCIA AL DESGASTE CON LA MAQUINA “LOS ANGELES”

Otro de los ensayos importantes al momento de evaluar los agregados para su empleo en la elaboración de hormigones es el de pérdida de peso por desgaste “Los Angeles”. Dicho ensayo fue aplicado a cada una de las muestras de AGR en estudio pertenecientes a ambas series, A y B, según el procedimiento descrito para los agregados gruesos naturales [Norma IRAM 1532]. La gradación adoptada para la realización del ensayo correspondió a la denominada “B”, para la cual se emplearon 2500 ± 10 g de material retenido en cada uno de los tamices de 12.7 y 9.5 mm, es decir un peso aproximado de 5000 g, adicionando 11 bolas de acero con un peso aproximado de 4584 ± 25 g, según se especifica en la citada norma. Los agregados reciclados junto con las bolas de acero se sometieron a 500 vueltas del tambor.

Los valores obtenidos en cada una de las doce muestras que componen la Serie A se presentan en la Figura 5.10. (Ver Tabla I.3 del Anexo I)

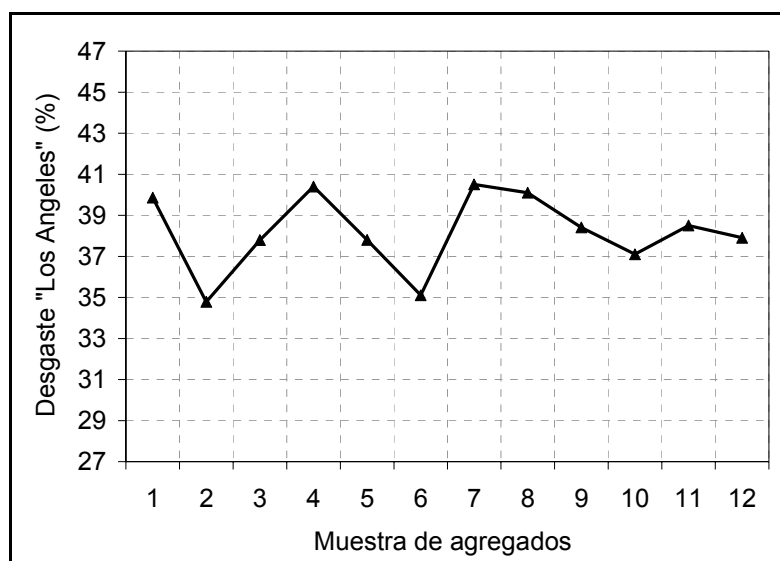


Figura 5.10 – Variación de la pérdida de peso por abrasión en el ensayo de desgaste “Los Angeles” de los AGR de la Serie A.

Puede observarse que la variación que presenta el ensayo de desgaste “Los Angeles” resulta más importante que las determinadas en las propiedades anteriormente evaluadas, con valores que se encuentran entre 34.8 y 40.5 %, con una media de 38.2 %, presentando la muestra 7 el mayor desgaste en tanto que la muestra 3 adquiere un valor medio. Dichos valores resultan superiores a los que se obtendrían en un agregado granítico natural (~ 25 %), debido a la presencia del mortero adherido a las partículas del agregado reciclado. Sin embargo, debe mencionarse que todos los valores resultan inferiores al límite máximo de pérdida (50 %) indicado en el Reglamento Argentino [CIRSOC 201].

En el caso de los agregados gruesos reciclados obtenidos en los cinco ciclos de reciclado (Serie B), los valores de desgaste “Los Angeles” obtenidos se presentan en la Figura 5.11. (Ver Tabla I.4 del Anexo I)

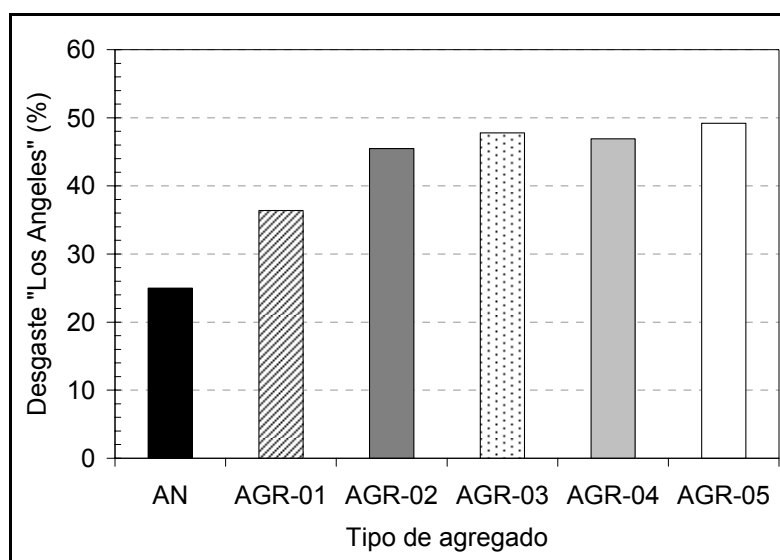


Figura 5.11 – Desgaste “Los Angeles” de los AGR de la Serie B.

Puede observarse que la pérdida que presentan los agregados AGR es superior a la del AN, debido al mortero que los mismos presentan en su composición. Dichos incrementos fueron del 46 % para el AGR-01, del 82 % para el AGR-02, y a partir del tercer ciclo (AGR-03) el incremento de pérdida con relación a la del agregado AN es del orden del 90 %, resultando aproximadamente constante para los siguientes ciclos de reciclado. En este caso también puede observarse que todos los AGR verifican el límite máximo admitido por el CIRSOC 201.

5.6 MATERIAL FINO QUE PASA POR EL TAMIZ IRAM 75 μm (N° 200)

La presencia de material pulverulento en exceso en los agregados resulta perjudicial al momento de su empleo en la elaboración de hormigones, por lo cual existen limitaciones a la cantidad que pueden admitirse de dicho material junto con los agregados. Por tal motivo, la determinación de la cantidad de polvo que puede ser aportado por los agregados gruesos reciclados resulta muy importante a la hora de permitir su empleo en la elaboración de nuevos hormigones con fines estructurales.

Para determinar la cantidad de polvo que puede aportar el agregado grueso reciclado, se realizó el ensayo descrito en la Norma IRAM 1540 para agregados naturales, el cual consiste en tamizar por vía húmeda a través del tamiz de abertura de malla 75 μm (N° 200) una muestra de aproximadamente 1000 g.

De las determinaciones realizadas sobre las doce muestras de AGR que componen la Serie A se obtuvo un valor medio de 0.76 %, con un mínimo de 0.06 % y un máximo de 3.41 %. Los valores obtenidos en cada una de las muestras se presentan en la Figura 5.12. (Ver Tabla I.3 del Anexo I)

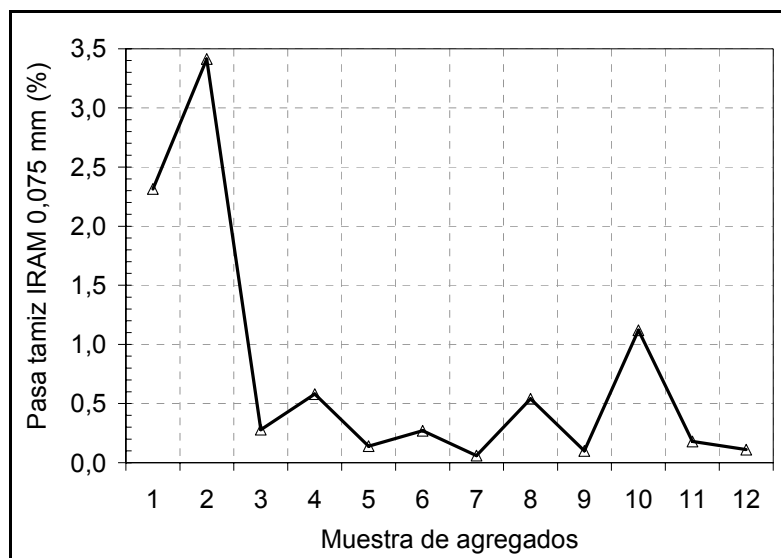


Figura 5.12 – Variación del porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM de 75 µm para los AGR de la Serie A.

Se observa que el contenido de material pulverulento que pueden contener los agregados reciclados está, en la mayoría de los casos, por debajo del 1.5 %, el cual es el límite máximo establecido en el Reglamento CIRSOC 201 para los agregados gruesos naturales de trituración. Sin embargo, puede suceder que dicha cantidad resulte superior al límite indicado, por lo que será muy importante el lavado del agregado reciclado previo a su utilización.

5.7 INDICES DE LAJAS Y ELONGACION

Otra propiedad de los agregados gruesos que debe tenerse en cuenta para la elaboración de hormigones es la relacionada con la forma que presentan sus partículas. Uno de los ensayos empleados para valorar esta propiedad consiste en determinar las cantidades relativas de partículas lajosas y elongadas presentes en la muestra seleccionada.

Se define como partículas lajosas aquellas en las cuales su menor dimensión es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción considerada, mientras que se

considera como partículas elongadas aquellas en las cuales su mayor dimensión es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción en estudio, y se expresan como índice de lajas (IL) e índice de elongación (IE) respectivamente [Norma IRAM 1687].

Los valores medios de los índices de lajas (IL) y de elongación (IE) determinados sobre las muestras de AGR seleccionadas en la Serie A, como así también sobre dos muestras de agregados gruesos naturales de tipo granítico (PPG) de diferente tamaño máximo (19 mm y 25 mm), se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1 – Índices de lajas y de elongación
de los AGR de la Serie A y AGN.**

Muestra	IL (%)	IE (%)
AGR (25 mm)	9.4	24.7
PPG (19 mm)	19.2	26.6
PPG (25 mm)	17.7	35.8

Puede observarse que el valor medio del índice de elongación del agregado grueso reciclado (AGR) fue inferior al de los agregados gruesos naturales (AGN), mientras que el valor medio del índice de lajas del AGR fue aproximadamente un 50 % menor que el correspondiente a los AGN. Debe mencionarse que los valores mínimos y máximos del IL para los AGR fueron de 8.3 y 11.1 %, mientras que dichos valores para el IE fueron 20.7 y 27.8 % respectivamente.

Los menores valores de ambos índices que presentan los agregados gruesos reciclados, en comparación con los hallados para los agregados gruesos naturales, son atribuidos al mortero de cemento adherido a dichos agregados, lo cual modifica la lajosidad del agregado natural haciendo que el nuevo agregado se presente con una forma más próxima a una partícula cúbica.

5.8 ENSAYO DE DURABILIDAD POR ATAQUE CON SULFATO DE SODIO

De acuerdo a lo indicado en el Reglamento *CIRSOC 201*, los agregados gruesos naturales utilizados para la elaboración de hormigones que estarán expuestos a ciclos de congelación y deshielo durante su vida en servicio, deben cumplir con el ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio, admitiéndose una pérdida máxima del 12 %.

Si bien este ensayo de durabilidad se encuentra normalizado para los agregados naturales, se decidió aplicarlo a alguna de las muestras de AGR seleccionadas para estos estudios.

El ensayo consistió en someter a las fracciones de agregado reciclado retenidas en los tamices IRAM 12.7 y 9.5 mm a cinco ciclos de mojado y secado en solución de sulfato de sodio anhidro con una concentración de 350 g/l [*Norma IRAM 1525*], luego de lo cual se procedió al lavado de la muestra y su posterior tamizado a través del tamiz IRAM 7.9 mm (5/16"), determinando la pérdida de masa (en %) respecto al peso inicial.

El valor medio de pérdida obtenido en el ensayo, realizado sobre cuatro de las doce muestras seleccionadas en la Serie A, fue de 44 %, con un valor máximo de 64.3 % y un mínimo de 23.9 %. Puede observarse que las pérdidas producidas son muy superiores al límite del 12 % anteriormente mencionado, como así también la existencia de una gran variabilidad. Esta mayor pérdida es atribuida a la elevada porosidad y baja resistencia del mortero presente en los AGR, el cual constituye el componente más débil que poseen estos agregados, mientras que la variabilidad mostrada en el ensayo es debido a los distintos contenidos de mortero que pueden presentar las muestras de AGR.

En función del resultado obtenido deben hacerse dos consideraciones: por un lado, el límite impuesto del 12 % es para los agregados naturales, y por otro lado, antes de descartar al agregado reciclado se debe verificar la otra premisa indicada en el mencionado reglamento, la cual establece que aquellos agregados que no cumplan con este requisito podrán ser igualmente empleados si se verifica que hormigones con ellos elaborados presentan un comportamiento satisfactorio luego de someterlos a 300 ciclos rápidos de congelación y deshielo [*Norma IRAM 1661*]. Se considera que dicho desempeño es adecuado cuando el coeficiente de durabilidad es superior al 80 %.

5.9 CONSIDERACION PARA LA EVALUACION Y EMPLEO DE LOS AGR

Un punto fundamental a tener en cuenta al momento de evaluar los agregados gruesos reciclados y más aún al momento de emplearlos para la elaboración de nuevos hormigones, es que los valores obtenidos de las distintas propiedades físico-mecánicas y durables evaluadas e informadas corresponden a muestras constituidas por 100 % de AGR, los cuales resultarán más próximos a los correspondientes a los AGN cuando las determinaciones se realicen sobre el conjunto granular AGN-AGR, y más aún cuanto menor sea el porcentaje de agregado reciclado empleado.

Capítulo 6

Segunda Etapa:

HORMIGONES RECICLADOS

Capítulo 6

Segunda Etapa

HORMIGONES RECICLADOS

6.1 INTRODUCCION

En estudios previos realizados en el LEMIT sobre hormigones de distintas razones agua/cemento, elaborados con agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural en porcentajes del 25, 50, 75 y 100 % en volumen, se llegó a la conclusión que hasta reemplazos del 75 % el comportamiento resistente de los mismos era similar al de los hormigones convencionales de similares características y elaborados con agregados naturales [Di Maio et al, 2002]. En dichos estudios, los agregados reciclados se obtuvieron de la trituración de un hormigón (a/c: 0.50) elaborado previamente en laboratorio.

A partir de los resultados mencionados, se adoptaron las premisas para el desarrollo de los estudios y tareas que forman parte de esta segunda parte del trabajo de tesis. Por un lado, se utilizaron agregados gruesos reciclados que resultaron de triturar hormigones con características tecnológicas desconocidas y diferentes (Serie A), los cuales fueron caracterizados en el Capítulo 5, mientras que por otro lado, se emplearon los agregados gruesos reciclados surgidos de realizar cinco ciclos de reciclado (Serie B), partiendo de un hormigón con características conocidas, los cuales también fueron caracterizados en el capítulo anterior.

En ambas situaciones se optó por reemplazar el agregado grueso natural por el agregado grueso reciclado en un 75 % en volumen, a partir de la conclusión alcanzada en experiencias anteriores como ya fue mencionado.

Para el empleo de los AGR que componen la Serie A se adoptaron tres dosificaciones con razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 para la elaboración de los diferentes hormigones convencionales (HC) y reciclados (HR-A).

Las correspondientes mezclas elaboradas con cada una de las doce muestras de AGR que componen la Serie A se indican en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 – Hormigones reciclados elaborados con cada muestra de AGR de la Serie A.

Muestras de AGR	HR-A		
	Razón a/c		
	0.40	0.50	0.60
AGR-1		X	
AGR-2	X		
AGR-3		X	X
AGR-4	X	X	
AGR-5		X	X
AGR-6	X	X	
AGR-7		X	X
AGR-8		X	
AGR-9		X	
AGR-10	X	X	
AGR-11		X	X
AGR-12	X	X	

Las proporciones en que fueron empleados los distintos materiales para la elaboración de cada uno de los hormigones HR-A y HC se presentan en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 – Proporciones de los materiales (kg/m³).

Materiales	Razón a/c					
	0.40		0.50		0.60	
	HC	HR-A	HC	HR-A	HC	HR-A
Agua	155		155		155	
Cemento	388		310		258	
Agregado Fino	830		900		940	
Agregado Grueso Natural	1040	260	1040	260	1040	260
Agregado Grueso Reciclado	-	715	-	715	-	715

En el caso de los agregados gruesos reciclados de la Serie B, se partió de un hormigón convencional (HC) de razón a/c 0.50 y los sucesivos hormigones reciclados

(HR-B) se elaboraron manteniendo constante las proporciones de dicho hormigón y reemplazando el AGN por los correspondientes AGR, según se indicó en la Figura 4.1.

Teniendo en cuenta el porcentaje de reemplazo utilizado, a partir del ciclo descrito en la mencionada Figura 4.1 es posible determinar la composición, en porcentaje, del conjunto granular empleado en la elaboración de los distintos hormigones reciclados (HR-01 al HR-05), lo cual es presentado en la Figura 6.1.

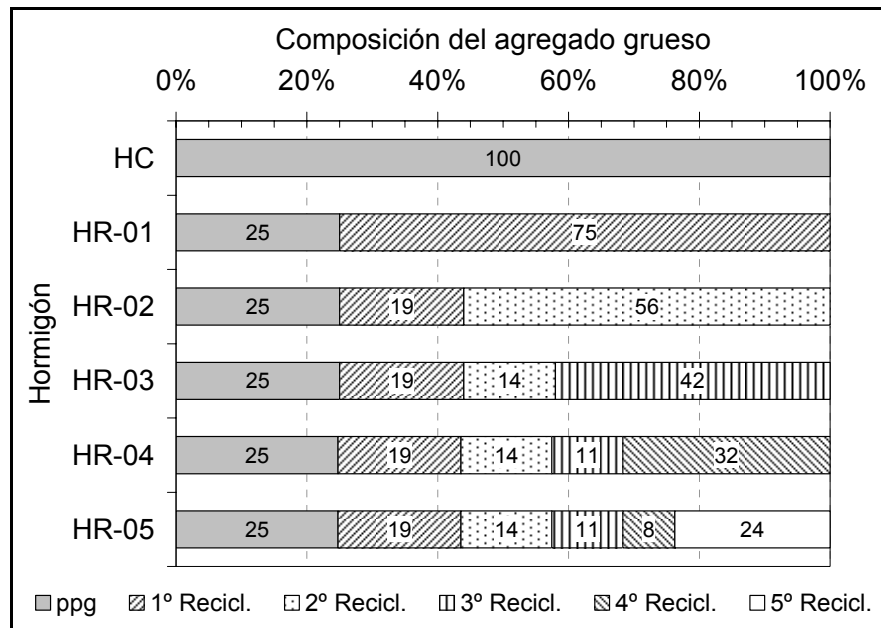


Figura 6.1 – Composición del agregado grueso utilizado en cada hormigón HR-B.

En dicha figura puede observarse que el hormigón HC contiene un 100 % de agregado grueso natural (ppg: piedra partida granítica). El HR-01 posee un 25 % de ppg y un 75 % del AGR-01 obtenido de la trituración del HC. A partir del HR-02 y hasta el HR-05 puede observarse que los mismos presentan un 25 % correspondiente al agregado grueso natural y el 75 % restante se encuentra dividido en distintos porcentajes, en mayor número cuanto más elevado resulta el número de ciclos realizados. De este modo, la primera fracción que aparece en cada caso (19 %) se considera que sufre un único proceso de trituración al provenir del 25 % de ppg del hormigón anterior; la segunda fracción en cuestión (56 % para el HR-02 y 14 % para los restantes HR) es la que experimenta dos procesos de trituración, proveniente del 75 % y del 19 % en cada caso respectivamente. En tal sentido se tiene que el agregado grueso reciclado utilizado en la elaboración del HR-05 estaría compuesto por un 19 % de AGR que sufrió un sólo proceso de trituración, un 14 % de AGR que estuvo sometido a dos

procesos de triturado, un 11 % de AGR con tres procesos de triturado, un 8 % de AGR con cuatro y un 24 % que realmente sufrió los cinco ciclos de reciclado.

Las proporciones de los distintos materiales utilizados para la elaboración de las mezclas convencional y recicladas de la Serie B se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 – Proporciones de las mezclas elaboradas con los AGR de la Serie B (kg/m³).

Materiales	Hormigones					
	HC	HR-01	HR-02	HR-03	HR-04	HR-05
Agua	155			155		
Cemento	310			310		
Agregado Fino	885			885		
Piedra partida granítica	1030			260		
Agregado grueso reciclado	0	710	695	685	675	675

Debido a la elevada capacidad de absorción de agua que poseen los AGR, para el empleo de ambas series de agregados A y B se decidió utilizar a los mismos en estado saturado colocándolos en agua 24 horas previo a su utilización, de modo que no demanden una mayor cantidad de agua de mezclado, lo cual modificaría las proporciones de las mezclas. Los agregados gruesos naturales fueron empleados en las mismas condiciones de humedad que los reciclados con el propósito de que no existan diferencias a la hora de determinar las distintas propiedades.

6.2 ESTADO FRESCO

A cada una de las mezclas recicladas y convencionales elaboradas se les determinaron algunas propiedades en estado fresco tales como el asentamiento, medido con el cono de Abrams [*Norma IRAM 1536*], el peso por unidad de volumen (PUV) [*Norma IRAM 1562*] y el contenido de aire naturalmente incorporado empleando el método de presión [*Norma IRAM 1602*].

Los asentamientos medidos en las diferentes mezclas recicladas elaboradas con los distintos AGR que componen la Serie A se presentan en la Figura 6.2. Puede observarse que dichos valores se encuentran en el rango 70 ± 20 mm, los cuales fueron similares a los medidos en los hormigones HC.

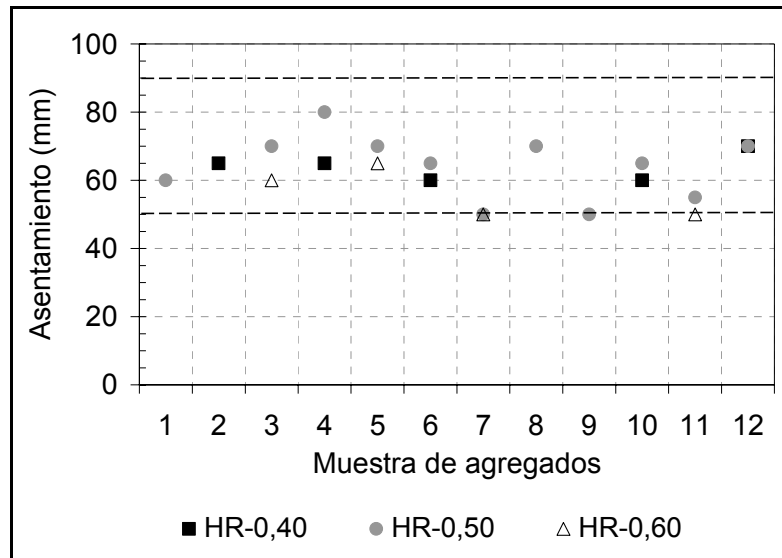


Figura 6.2 – Asentamiento de los hormigones HR-A.

En la Figura 6.3 se presentan los asentamientos medidos sobre las mezclas convencional y recicladas elaboradas con los AGR obtenidos al realizar los cinco ciclos de reciclado (Serie B).

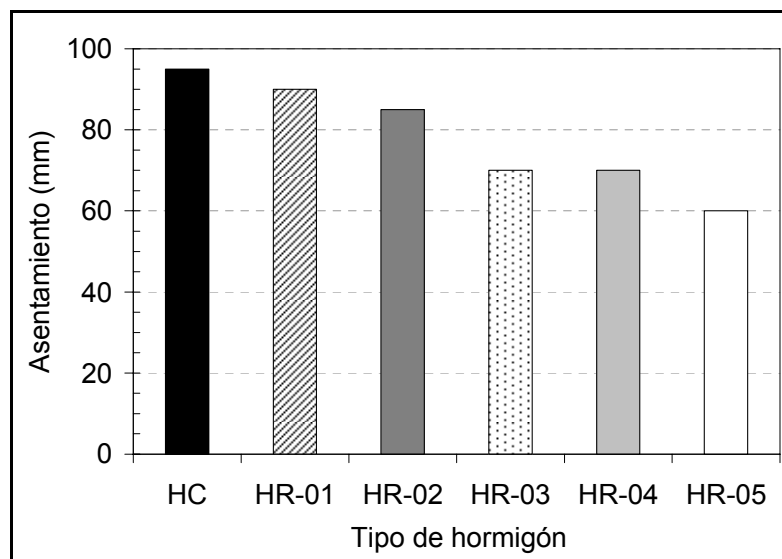


Figura 6.3 – Asentamiento de los hormigones HR-B.

Puede observarse que las mezclas correspondientes a los dos primeros ciclos (HR-01 y HR-02) presentan valores de asentamiento similares al del hormigón convencional (HC), hecho atribuido al empleo de los agregados en estado saturado. Los asentamientos correspondientes a las mezclas del tercer al quinto ciclo presentan valores levemente inferiores al de las anteriormente mencionadas, a pesar de haber utilizado a

los agregados en igual estado de humedad. Este hecho puede ser atribuido a una mayor rugosidad superficial de los AGR debido al mayor contenido de mortero de los mismos.

Es sabido que el asentamiento es una medida de la consistencia de la mezcla y que en muchos casos éste puede diferir de manera importante con la trabajabilidad de la misma, es decir, una mezcla con un determinado valor de asentamiento no implica necesariamente que pueda ser manipulada en forma adecuada cuando se realizan las tareas de transporte, colocación y compactación.

Para el caso de las mezclas elaboradas en estos estudios, con agregados gruesos reciclados en reemplazo del 75 % en volumen del agregado grueso natural, debe mencionarse que las mismas presentaron en todos los casos buenas características de trabajabilidad y terminación, semejantes a las encontradas en mezclas de similares características elaboradas en su totalidad con agregados naturales, resultando prácticamente imposible poder diferenciar a simple vista unas de otras. Este hecho es atribuido al empleo de los agregados gruesos reciclados en estado saturado, como fue mencionado anteriormente.

Los pesos por unidad de volumen (PUV) determinados en los diferentes hormigones HR-A se presentan en la Figura 6.4.

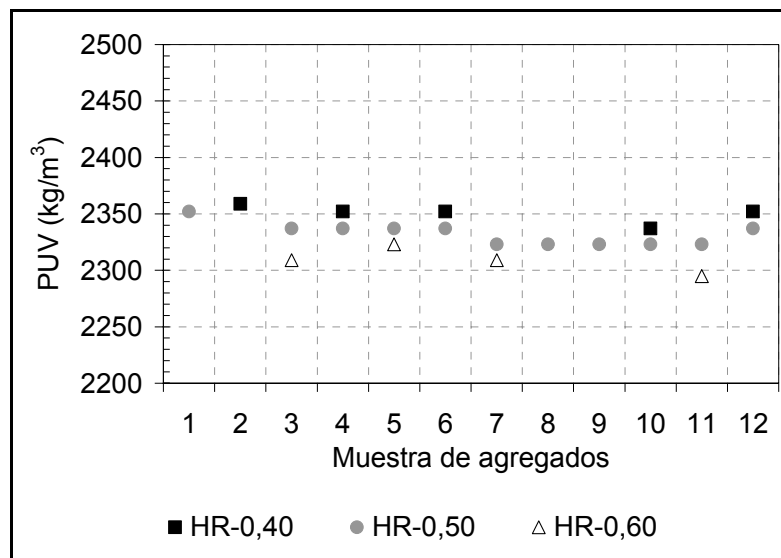


Figura 6.4 – Peso por unidad de volumen de los hormigones HR-A.

Puede observarse que los PUV correspondientes a los hormigones HR elaborados con las distintas muestras de AGR de la Serie A presentan una baja

dispersión, para cada una de las razones a/c estudiadas, no evidenciándose influencia de la variación mostrada por la densidad de los agregados reciclados. Los PUV de los hormigones HR-A resultaron, aproximadamente, 100 kg/m^3 inferiores a los determinados en los HC, hecho que está directamente vinculado con la menor densidad que presentan los AGR debido, como se mencionó en capítulos anteriores, al mortero de cemento existente en los mismos.

Respecto a los valores de PUV determinados sobre el hormigón convencional y sobre los distintos hormigones reciclados elaborados con los AGR de la Serie B, los mismos se presentan en la Figura 6.5.

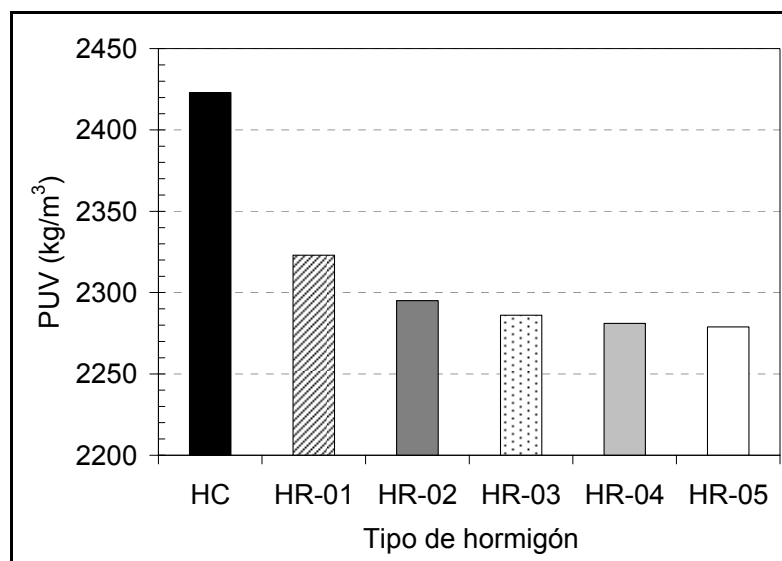


Figura 6.5 – Peso por unidad de volumen de los hormigones HR-B.

Se observa una disminución de aproximadamente 100 kg/m^3 en el PUV del hormigón del primer ciclo (HR-01) con relación al hormigón convencional (HC), es decir, semejante a la encontrada en el caso de los hormigones elaborados con los AGR de la Serie A (ver Figura 6.4). A partir del segundo ciclo, los PUV continúan disminuyendo aunque lo hacen en menor medida, resultando en los últimos ciclos prácticamente similares. Este hecho es atribuido al mayor contenido de mortero que contienen los hormigones reciclados conforme aumentan los ciclos de reciclado. Dicho comportamiento resulta coincidente con el observado en la densidad de los AGR de la Serie B (ver Figura 5.6).

Con relación al contenido de aire naturalmente incorporado de los hormigones HR-A, debe mencionarse que los mismos se encontraron entre el 2 y 3 % para todas las

razones a/c, resultando similares a los medidos en los hormigones HC. En la Figura 6.6 se presentan los diferentes valores de aire naturalmente incorporado medido en los distintos hormigones HR-A.

En el caso de los HR-B, los contenidos de aire naturalmente incorporado también estuvieron comprendidos entre el 2 y 3 %.

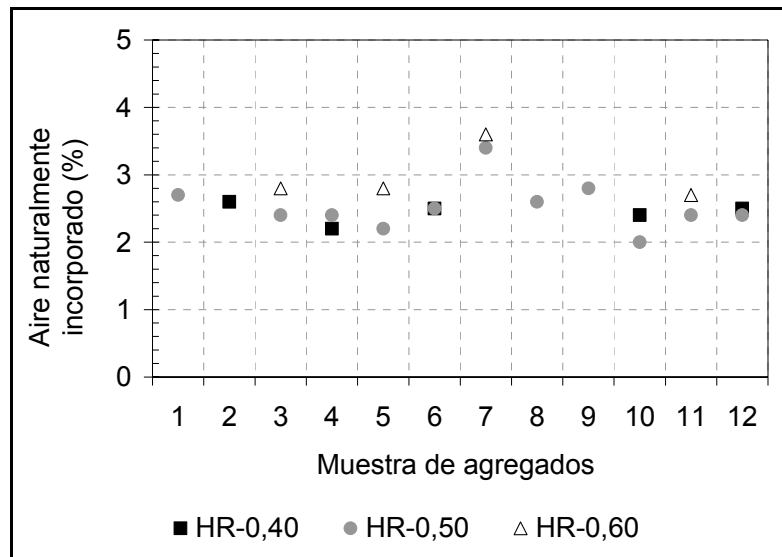


Figura 6.6 – Contenido de aire naturalmente incorporado de los hormigones HR-A.

6.3 ESTADO ENDURECIDO

Sobre las muestras elaboradas con los diferentes hormigones HR, a la edad de 28 días, se procedió a la determinación de distintas propiedades físico-mecánicas, las cuales fueron comparadas con las obtenidas sobre los hormigones HC. Los parámetros determinados sobre ambos tipos de hormigones fueron:

- Absorción, densidad y porosidad
- Resistencia a compresión
- Módulo de elasticidad estático
- Velocidad del pulso ultrasónico
- Módulo de elasticidad dinámico
- Resistencia al quebramiento - Presión Break-Off

6.3.1 Absorción, densidad y porosidad

Sobre muestras representativas de los diferentes hormigones elaborados se determinó la absorción de agua en 24 horas, la densidad en condición saturada y superficie seca y en condición seca, y la porosidad. Los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento indicado por la American Society for Testing and Materials [Norma ASTM C 642-90]. Los resultados obtenidos se indican en las Tablas II.1 y II.2 del Anexo II.

Los valores medios de absorción obtenidos en los hormigones HR-A y HC para las distintas razones a/c estudiadas, se presentan en la Figura 6.7.

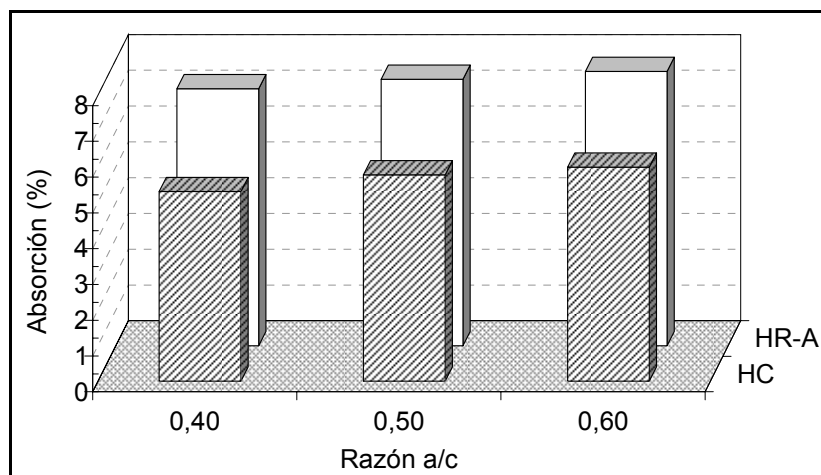


Figura 6.7 – Absorción de agua de los hormigones HR-A y HC.

Puede observarse que los hormigones HR-A presentan, para las tres razones a/c evaluadas, mayores valores de absorción de agua que los correspondientes hormigones HC. Los incrementos fueron del 35,5, 29,1 y 28,2 % para las razones a/c 0,40, 0,50 y 0,60 respectivamente. Estos valores están mostrando una mayor influencia de los AGR en los hormigones de menor razón a/c que en aquellos de menor calidad ($> a/c$).

En las Figuras 6.8 y 6.9 se presentan los valores medios de densidad en condición saturada y superficie seca (D_{sss}) y densidad seca (D_s) respectivamente de los hormigones HR-A y HC en estudio.

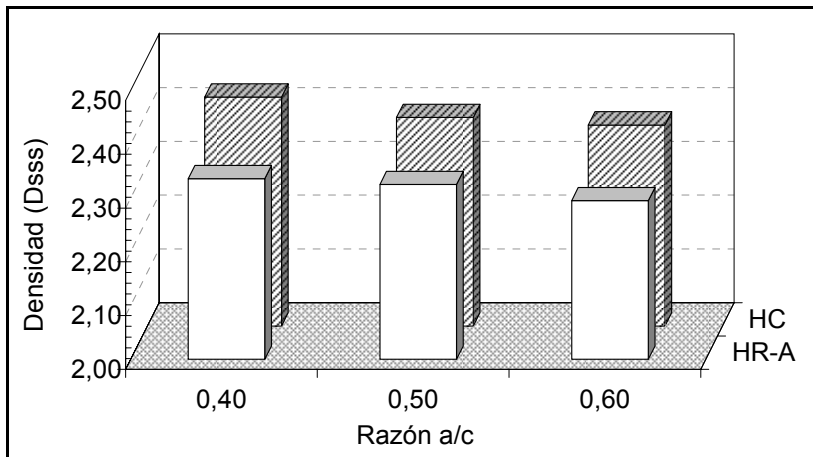


Figura 6.8 – Densidad en condición saturada y superficie seca de los HR-A y HC.

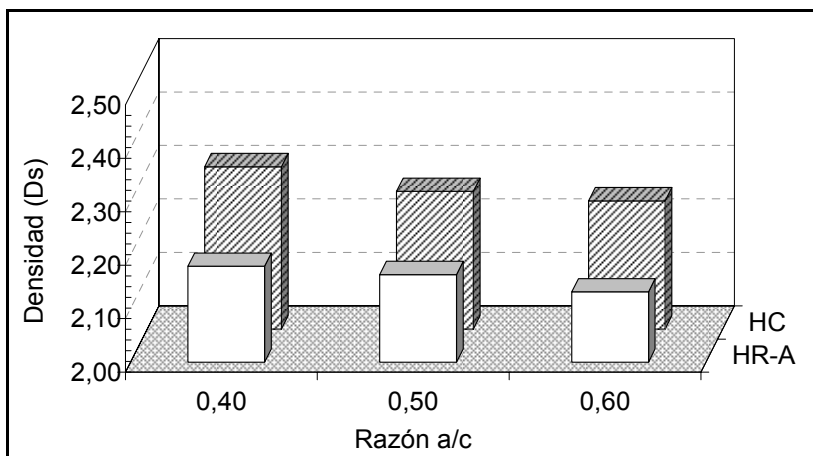


Figura 6.9 – Densidad en condición seca de los HR-A y HC.

En ambos casos se observa, para cada razón a/c, una disminución de la densidad de los HR-A con relación a la de los correspondientes HC debido a la menor densidad que presentan los AGR, tal como se indicó en el punto 5.3. Dicha disminución resultó ser del 3.7, 2.6 y 3.3 % en el caso de la Dss y del 5.4, 4.2 y 4.8 % en el caso de la Ds, para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 respectivamente.

Puede observarse que, al igual de lo que sucede con la absorción, los hormigones HR-A de menor razón a/c presentan mayores diferencias con relación a los HC. Este hecho estaría indicando que la densidad de los HR resulta más afectada por la densidad de los AGR cuanto mejor sea la calidad de la matriz del nuevo hormigón.

En la Figura 6.10 se presentan los valores de porosidad obtenidos a partir de relacionar las densidades Dss y Ds. Puede observarse que el hormigón HR-A presenta

una mayor porosidad que el hormigón HC de igual razón a/c, siendo los aumentos del 28.1, 23.7 y 22.0 % para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 respectivamente. Además, se puede observar que el incremento mencionado resulta, una vez más, de mayor significación para las razones a/c menores.

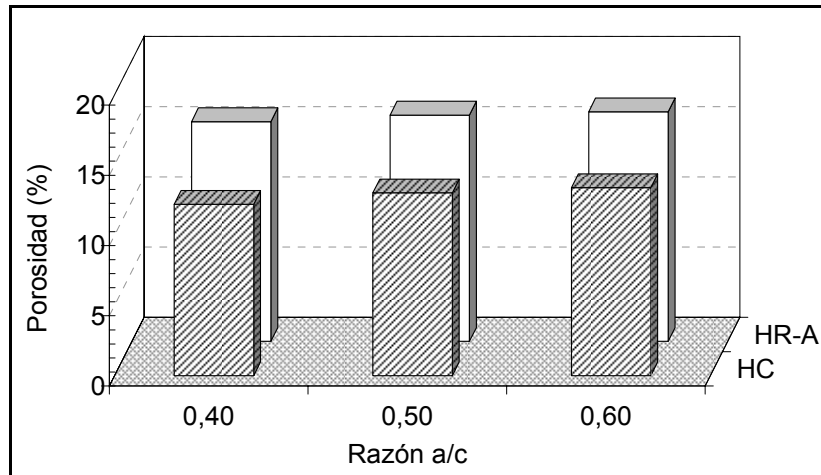


Figura 6.10 – Porosidad de los hormigones HR-A y HC.

Los valores de absorción de agua, promedio de tres determinaciones en cada caso, obtenidos para el hormigón convencional y sobre los distintos hormigones HR-B se presentan en la Figura 6.11.

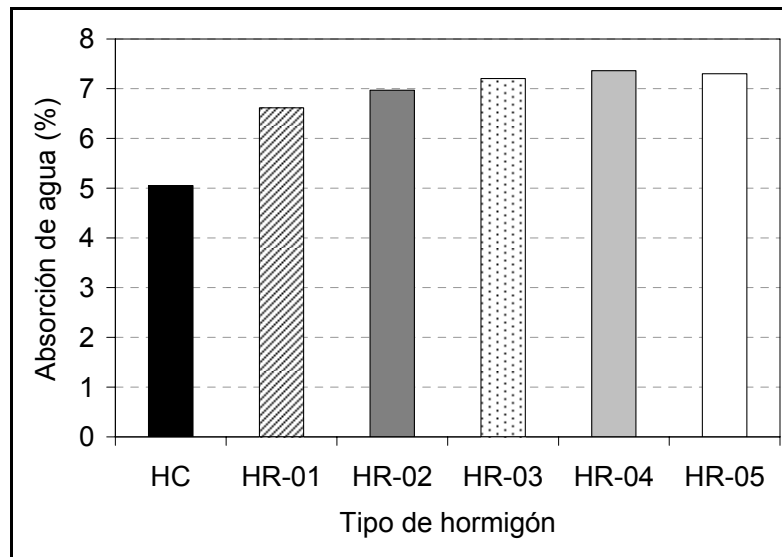


Figura 6.11 – Absorción de agua de los hormigones HR-B.

En dicha figura puede observarse un importante incremento de la absorción de agua en el hormigón del 1º ciclo (HR-01) con relación al HC, del orden del 31 %. Este

incremento se va atenuando a partir del 2º ciclo, adoptando valores del 38, 43 y 46 % con relación a la del hormigón HC.

Este hecho es atribuido, como ya fuera mencionado, al mayor contenido de mortero que presentan los HR y al porcentaje de reemplazo utilizado, 75 %, ya que si el reemplazo del agregado grueso se hiciera en su totalidad el contenido de mortero de los sucesivos hormigones sería mayor y en consecuencia las absorciones de agua también lo serían.

Las densidades en estado seco (D_s) correspondiente al hormigón convencional y a los sucesivos hormigones HR-B se presentan en la Figura 6.12.

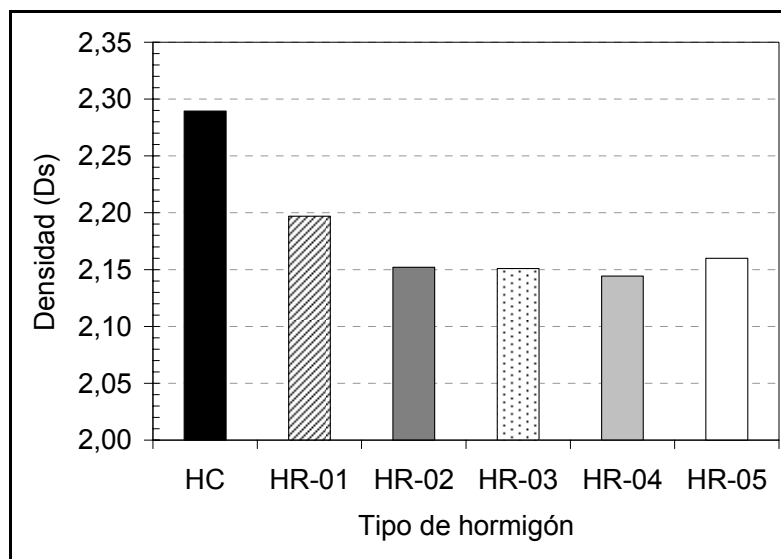


Figura 6.12 – Densidad en estado seco de los HR-B y HC.

Como pudo observarse en los valores de PUV medidos sobre los hormigones HR-B (ver Figura 6.5), en este caso también se observa una disminución más importante de la densidad en los dos primeros ciclos y luego los mismos tienden a hacerse constantes conforme siguen aumentando el número de ciclos. Este hecho es atribuido a la menor densidad que presentan los AGR de la Serie B al sucederse los ciclos de reciclado como así también al porcentaje de AGR utilizado.

En el caso de la porosidad, la variación que presenta a medida que se produce un nuevo ciclo de reciclado es similar a la observada en el caso de la absorción de agua. Los valores se presentan en la Figura 6.13.

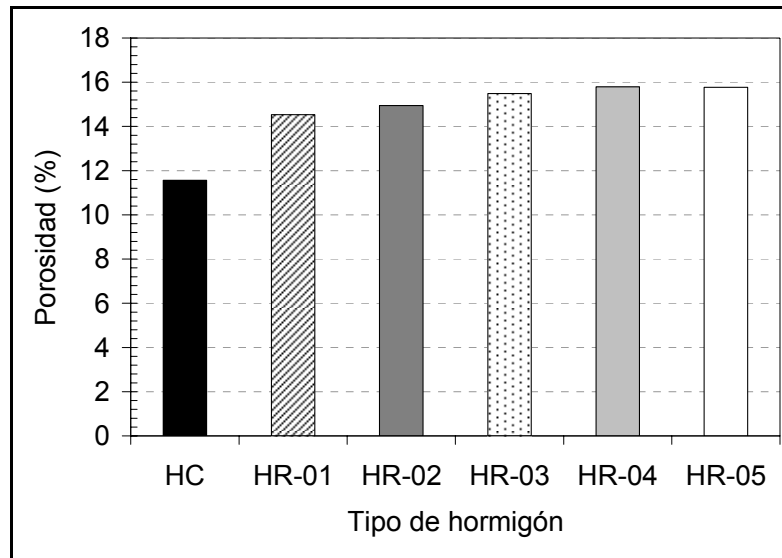


Figura 6.13 – Porosidad de los hormigones HR-B y HC.

De los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros físicos de absorción, densidad y porosidad sobre el hormigón convencional y sobre los sucesivos hormigones reciclados (HR-B), puede resaltarse una disminución apreciable de los mismos en el primer ciclo (HR-01) debido por un lado a la disminución en las propiedades de los AGR y por otro lado al elevado porcentaje de reemplazo utilizado (75 % en volumen). En el segundo ciclo las propiedades experimentan una nueva disminución aunque en menor medida que la anterior y a partir del tercer ciclo puede observarse que todas las propiedades permanecen aproximadamente constantes hasta el último de los ciclos.

Este hecho debe ser atribuido a que no se trabajó con un porcentaje de reemplazo del 100 %, hecho que lleva a su vez a que la cantidad neta de material que experimenta un elevado número de ciclos de reciclado sea cada vez menor, según resulta de la Figura 6.1.

6.3.2 Resistencia a compresión

La determinación de la resistencia a compresión (f'_c) de los distintos hormigones HR y HC evaluados se realizó de acuerdo a lo indicado en la *Norma IRAM 1546*, mediante el empleo de una prensa hidráulica INSTRON de 100 tn de capacidad de carga y control por lazo cerrado, lo cual permitió trazar curvas tensión vs. deformación hasta superada la carga de rotura.

En las Figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se presentan curvas tensión relativa vs. deformación representativas de los hormigones HR-A y HC en estudio, para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 respectivamente.

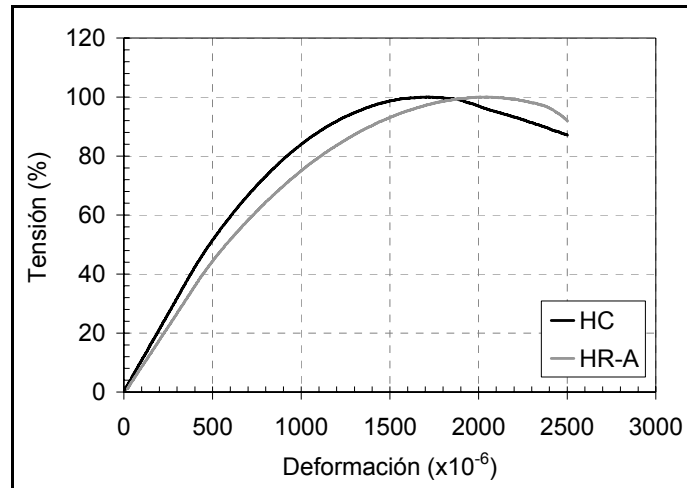


Figura 6.14 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.40.

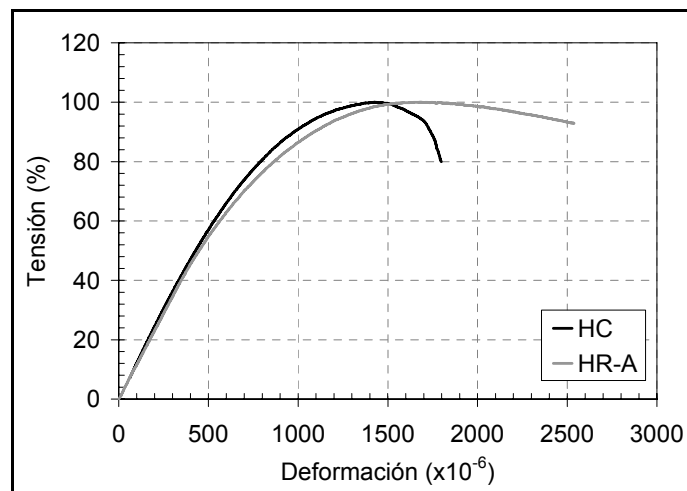


Figura 6.15 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.50.

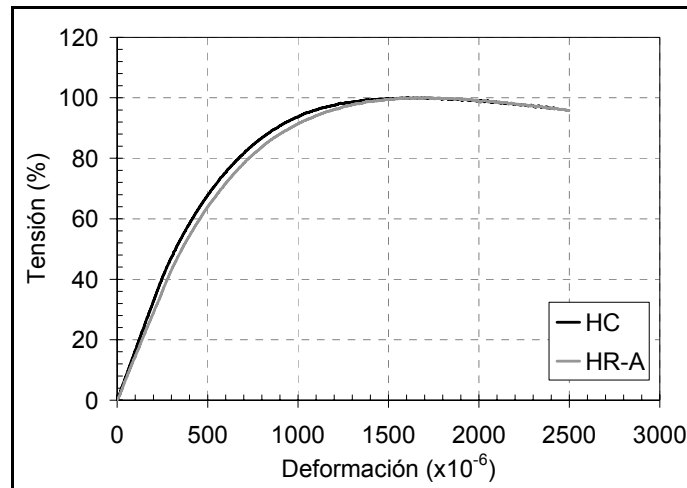


Figura 6.16 – Curvas tensión relativa vs. deformación para a/c 0.60.

En cada una de las figuras puede observarse que en los HR-A el valor máximo de tensión se produce para mayores valores de deformación que los correspondientes a los HC. Este hecho es atribuido al mayor contenido de mortero que poseen los HR, lo cual se traduce en una disminución del módulo de elasticidad estático de los HR-A como se mencionó anteriormente.

En la Figura 6.17 se presentan los valores medios de resistencia a compresión obtenidos en los hormigones HR-A y HC correspondientes a cada razón a/c en estudio. (Ver Tabla II.1 del Anexo II)

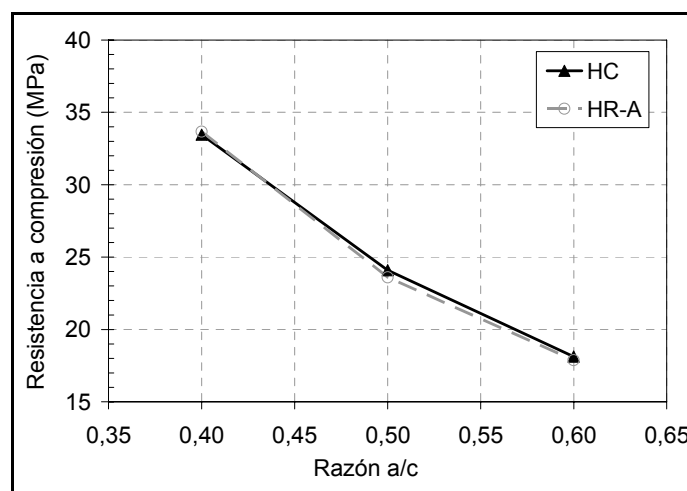


Figura 6.17 – Variación de la resistencia a compresión de los hormigones HR-A y HC con la razón a/c.

Puede observarse que la variación de la resistencia a compresión con la razón a/c en los HR-A es semejante a la que se produce en los HC, disminuyendo al incrementarse

dicha relación. Por otro lado, se observa que el nivel resistente de los hormigones HR-A, elaborados empleando los AGR que componen la Serie A en reemplazo del 75 % en volumen del AGN, es similar al de los hormigones HC. Este comportamiento es válido para las razones a/c evaluadas y para hormigones elaborados con piedra partida granítica como agregado grueso natural.

Teniendo en cuenta la variabilidad obtenida en cada una de las propiedades evaluadas en las diferentes muestras de AGR de la Serie A, presentadas en el Capítulo 5, resulta de suma importancia conocer la variación que puede producirse en las diferentes propiedades de los hormigones elaborados cuando se emplean dichos agregados, fundamentalmente la resistencia a compresión.

Por dicha razón, se elaboraron para una misma razón a/c distintos hormigones empleando las diferentes muestras de AGR que componen la Serie A. En el caso particular de la razón a/c 0.50, se decidió realizar dicho procedimiento para casi la totalidad de las muestras de AGR seleccionadas, no incluyéndose la muestra 2 por cuestiones meramente operativas.

En la Figura 6.18 se presentan los valores individuales (barras verticales) y el valor medio (línea continua) de resistencia a compresión (f_c) obtenidos en los hormigones HR-A para la razón a/c 0.50. (Ver Tabla II.3 del Anexo II)

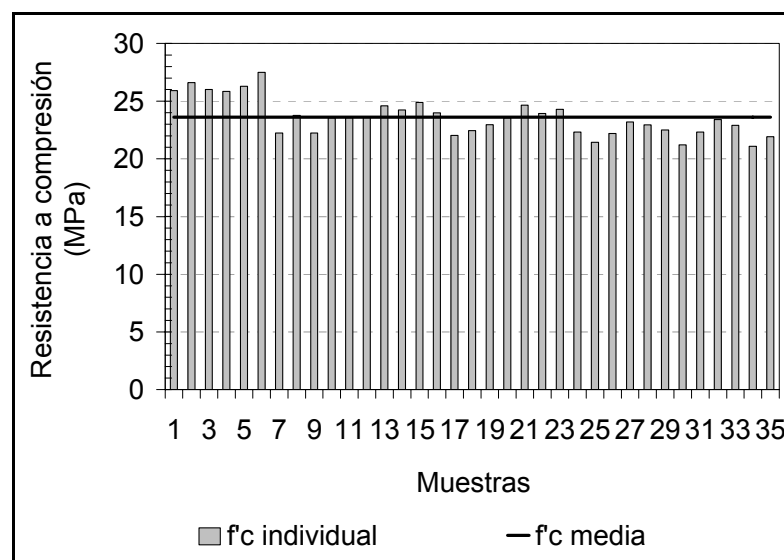


Figura 6.18 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.50.

Para el nivel de resistencia determinado (23.6 MPa) se obtuvo un desvío estándar (s) de 1.6 MPa y un coeficiente de variación (δ) de 6.8 %, los cuales representan parámetros normales medidos en hormigones convencionales.

En el caso de las restantes razones a/c estudiadas, los valores de desvío estándar y coeficiente de variación fueron de 2.1 MPa y 6.2 % para el HR-0.40 y 1.4 MPa y 7.6 % para el HR-0.60. En las Figuras 6.19 y 6.20 se presentan los valores individuales y medio de la resistencia a compresión de los hormigones HR-0.40 y HR-0.60 respectivamente. (Ver Tabla II.3 del Anexo II)

Por otro lado, debe mencionarse que los valores de desvío estándar obtenidos para los hormigones HC fueron de 1.7, 1.2 y 0.7 MPa, mientras que los del coeficiente de variación fueron de 5.2, 4.8 y 3.7 % para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 respectivamente. Puede observarse que ambos parámetros estadísticos son similares en ambos tipos de hormigones, hecho que estaría indicando que la variabilidad en el comportamiento resistente de los hormigones HR-A resulta similar a la de los hormigones elaborados con agregados naturales, a pesar de haber empleado agregados gruesos reciclados provenientes de la trituración de hormigones de desecho de diversas características tecnológicas y en reemplazo del 75 % del AGN.

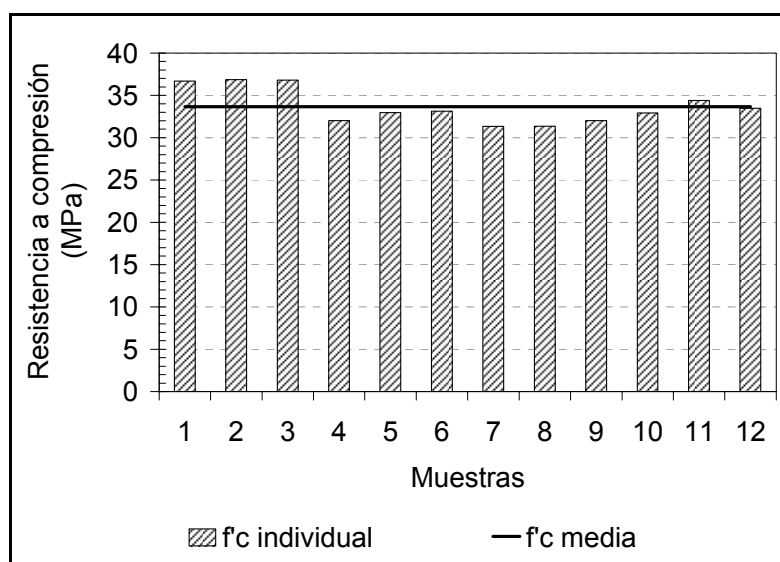


Figura 6.19 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.40.

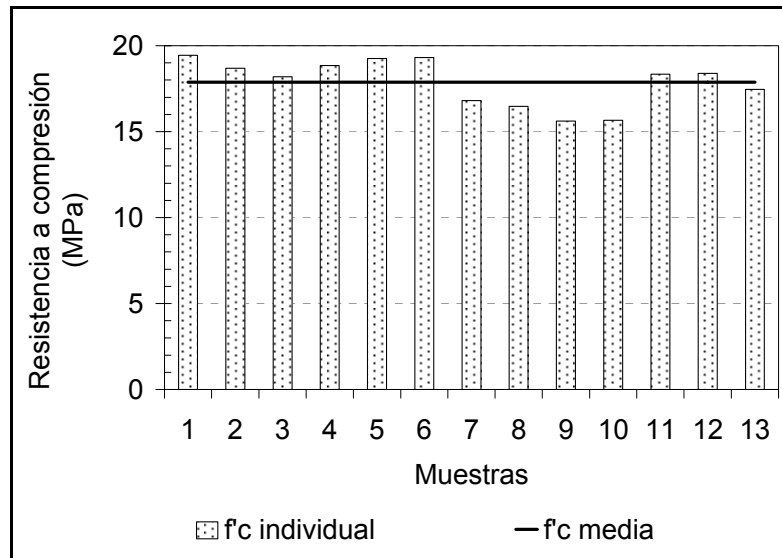


Figura 6.20 – Variación de la resistencia a compresión del HR-0.60.

Las resistencias a compresión obtenidas en el hormigón convencional y en los sucesivos hormigones reciclados que forman parte de los cinco ciclos de reciclado se presentan en la Figura 6.21. Cada valor surge del promedio de al menos tres ensayos. (Ver Tabla II.2 del Anexo II)

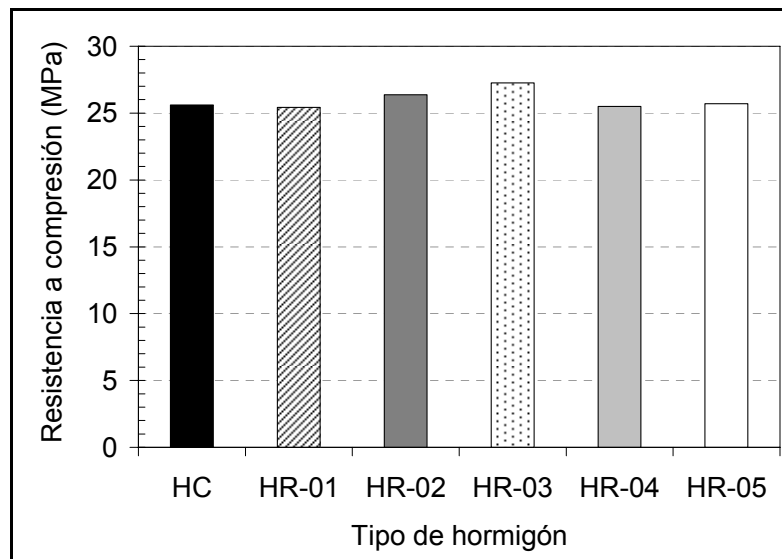


Figura 6.21 – Resistencia a compresión de los hormigones HR-B y HC.

Puede observarse que los hormigones HR-B correspondientes a los cinco ciclos de reciclado presentan un nivel resistente similar, el cual resulta prácticamente igual al del hormigón convencional a partir del cual se comenzaron a realizar los ciclos. Estos resultados tienen validez para el nivel resistente estudiado, el porcentaje de reemplazo seleccionado y el tipo de agregado grueso natural utilizado (piedra partida granítica).

6.3.3 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático de los diferentes hormigones HR en estudio, como así también de los hormigones HC, se determinó sobre muestras cilíndricas de 150 x 300 mm a la edad de 28 días. Cada muestra fue sometida a dos ciclos de carga y descarga, continuando luego con el incremento de la misma hasta la rotura [Norma ASTM C 469-87].

La determinación del módulo estático se realizó considerando las tensiones al 5 y 40 % de la carga máxima, y las deformaciones longitudinales correspondientes a cada una de las tensiones anteriormente definidas.

En la Figura 6.22 se presentan los módulos de elasticidad estático obtenidos sobre los diferentes hormigones HR-A elaborados empleando cada una de las doce muestras de AGR de la Serie A. Cada punto de la figura corresponde al promedio de tres determinaciones.

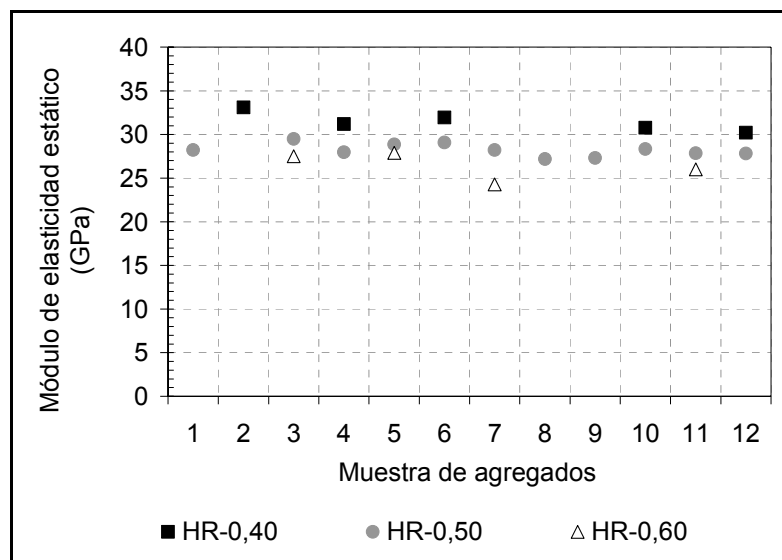


Figura 6.22 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-A.

Considerando cada una de las razones a/c evaluadas, puede observarse que los módulos estáticos resultaron semejantes en todos los hormigones, a pesar de haber sido elaborados con las diferentes muestras de AGR. Observando las muestras 3 y 7, se advierte que el hormigón HR-0.60 elaborado con la muestra 7 presenta el menor módulo, debido a la menor densidad que posee dicha muestra de AGR. A pesar de ello, la

variabilidad presentada en este tipo de hormigones resulta similar a la que puede producirse en los hormigones elaborados con agregados naturales.

En la Figura 6.23 se presentan, de manera comparativa, los valores medios del módulo de elasticidad estático determinados sobre los hormigones HR-A y HC, para cada razón a/c estudiada (Ver Tabla II.1 del Anexo II). En el caso de los HR-A se obtuvieron desvíos estándar (s) de 1.8, 1.3 y 1.7 GPa mientras que en los HC fueron de 1.5, 2.5 y 1.2 GPa para cada razón a/c. Los coeficientes de variación (δ) resultaron 5.8, 4.7 y 6.3 % en los HR-A y 4.4, 7.5 y 4.1 % en los HC. Puede observarse que los valores obtenidos en ambos parámetros (s y δ) resultaron similares en ambos tipos de hormigones.

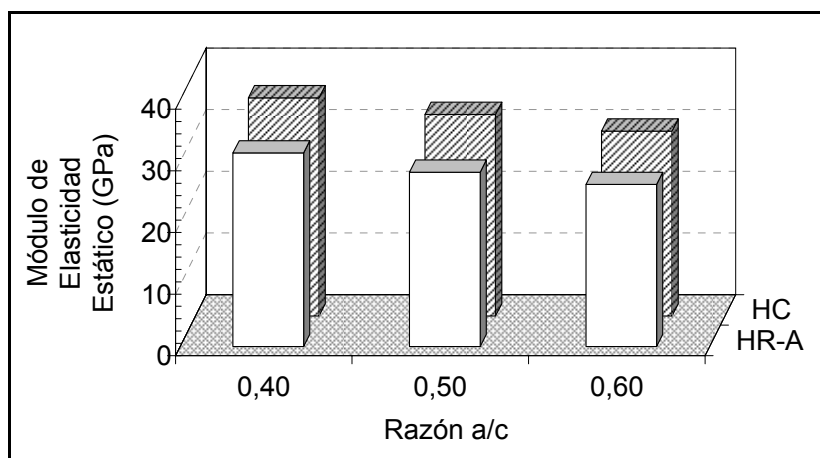


Figura 6.23 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-A y HC.

Se observa que el módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-A es de aproximadamente un 12 % inferior al de los HC. Este hecho es atribuido a la mayor deformabilidad que presenta el agregado grueso reciclado como consecuencia del mortero de cemento que los mismos presentan en su composición.

Los módulos de elasticidad estático determinados sobre los hormigones HR-B, como así también el del hormigón convencional, se presentan en la Figura 6.24. (Ver Tabla II.2 del Anexo II)

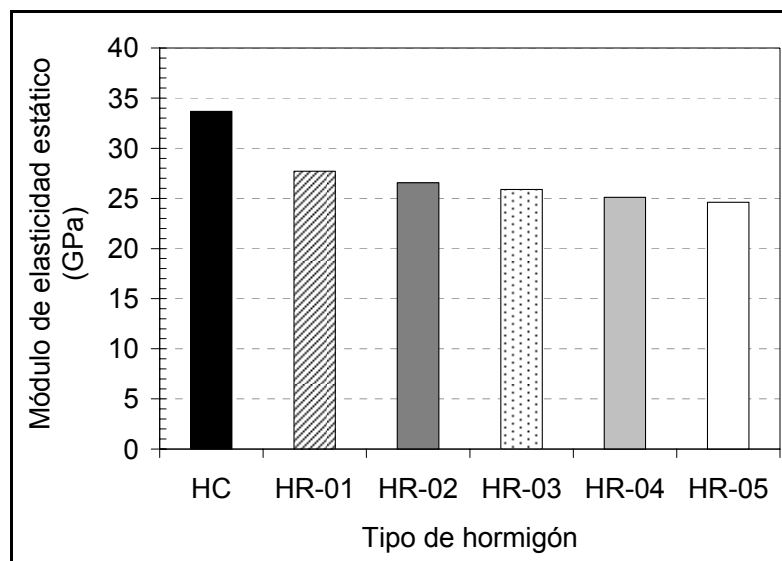


Figura 6.24 – Módulo de elasticidad estático de los hormigones HR-B y HC.

Se observa una mayor disminución del módulo de elasticidad estático en el hormigón del primer ciclo (HR-01) con relación al HC (18 %). A partir del segundo ciclo dichas disminuciones resultan aproximadamente constantes, con valores de 21, 23, 25 y 27 %.

6.3.4 Velocidad del pulso ultrasónico

La determinación del tiempo de pasaje de la onda ultrasónica [Norma IRAM 1683] se realizó sobre las muestras cilíndricas de 150 x 300 mm elaboradas con los distintos hormigones HR-A y HR-B, previo al ensayo de compresión. Además, se realizaron determinaciones sobre las muestras elaboradas con los hormigones HC, de manera de tener parámetros de referencia al momento de analizar el comportamiento de los hormigones reciclados. Para su determinación se empleó un equipo ultrasónico digital portátil con una frecuencia de 54 kHz y una precisión de lectura de 0.1 μ s.

En la Figura 6.25 se presentan las velocidades del pulso ultrasónico obtenidas sobre los diferentes hormigones HR-A, elaborados con las distintas muestras de AGR que componen la Serie A. Cada punto resulta del promedio de tres determinaciones.

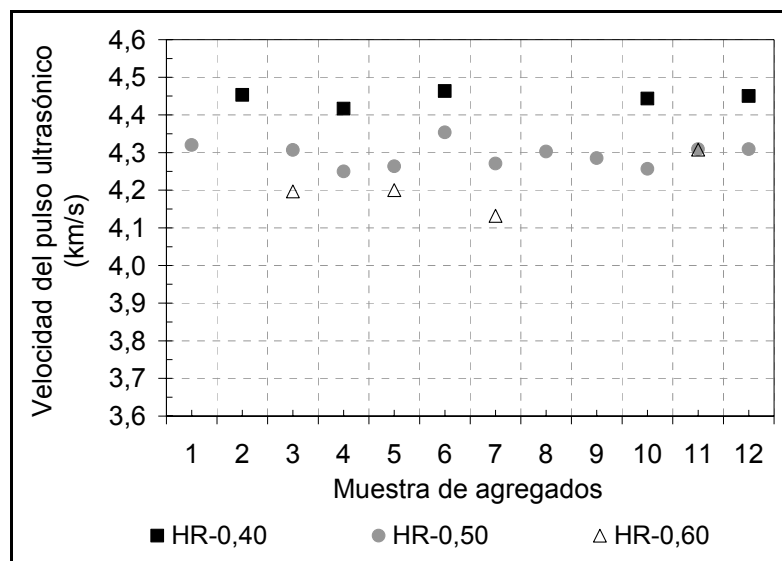


Figura 6.25 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-A.

Puede observarse que los valores obtenidos para cada una de las razones a/c evaluadas resultaron similares entre sí, con una baja variación, a pesar de haber empleado AGR de orígenes desconocidos y variados.

Considerando las muestras 3 y 7, pertenecientes a la Serie A, cuyos valores de densidad resultaron ser el mayor y menor respectivamente de todas las muestras, puede observarse que para el hormigón HR-0.50 los valores que adopta la velocidad resultan similares entre sí, mientras que para el HR-0.60 se observa un menor valor en el caso de la muestra 7. Este hecho debe ser atribuido a la menor densidad que presenta dicha muestra de AGR.

En la Figura 6.26 se presentan los valores medios de velocidad del pulso ultrasónico determinados sobre los hormigones HR-A y HC, para las tres razones a/c estudiadas. Dichos resultados se indican también en la Tabla II.1 del Anexo II. Los valores de desvío estándar (s) obtenidos en los hormigones HR-A fueron de 0.1 km/s para las tres razones a/c estudiadas, los cuales resultaron similares a los de los HC. Los coeficientes de variación (δ) fueron 1.2, 1.3 y 1.7 % en los HR-A y 1.2, 1.5 y 1.7 % en los HC, para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60 respectivamente. Puede observarse que los valores obtenidos de ambos parámetros resultan similares en todos los hormigones.

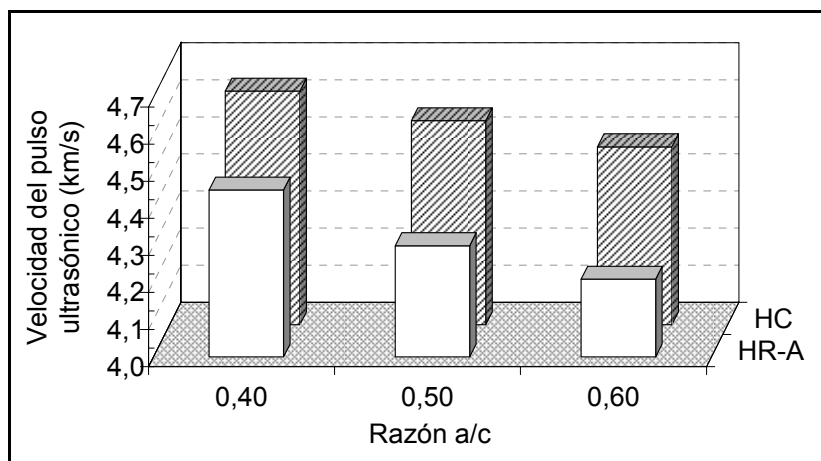


Figura 6.26 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-A y HC.

Se aprecia una disminución de las velocidades ultrasónicas determinadas sobre los hormigones HR-A en comparación con las obtenidas sobre los hormigones HC, para cada una de las razones a/c evaluadas, hecho atribuido a la menor densidad que presentan los AGR respecto a los AGN. Los valores medios de velocidad de los HR-A resultaron aproximadamente un 5 % inferiores a los del HC para las distintas razones a/c. También puede observarse que, en los HR-A, al igual de lo que sucede en los HC, al incrementarse la razón a/c se produce una disminución de la velocidad ultrasónica.

Si bien los menores valores de velocidad ultrasónica que presentan los hormigones HR-A, en comparación con sus pares HC, se atribuyen a la menor densidad que poseen los AGR, de los resultados obtenidos surge que para diferentes hormigones HR correspondientes a un mismo nivel resistente, las variaciones que podrían producirse entre diferentes partidas de AGR no serían significativas como para provocar modificaciones importantes en la velocidad del pulso ultrasónico.

Las velocidades del pulso ultrasónico determinadas sobre el hormigón convencional y sobre los sucesivos hormigones reciclados elaborados con los AGR de la Serie B se presentan en la Figura 6.27. (Ver Tabla II.2 del Anexo II)

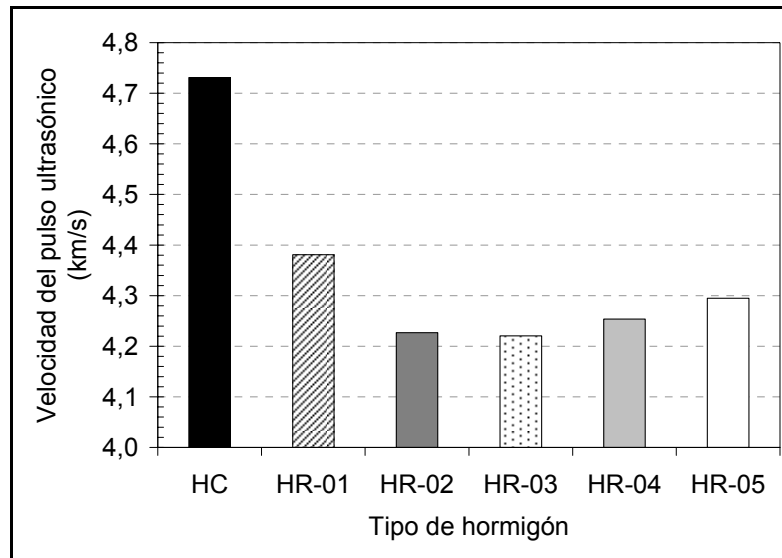


Figura 6.27 – Velocidad del pulso ultrasónico de los hormigones HR-B y HC.

Se observa una disminución del 7 % en la velocidad del pulso ultrasónico del hormigón HR-01 con relación a la determinada sobre el hormigón HC, debido como fue mencionado en el caso de los HR-A a la menor densidad que presentan los AGR. En el caso del HR-02 la disminución de velocidad respecto al HR-01 es del 4 % y a partir del tercer ciclo de reciclado los valores experimentan un leve ascenso. Este hecho podría explicarse en diferentes contenidos de humedad de las muestras ensayadas, debido a que la mayor porosidad que presentan las mismas podría hacer que retengan un mayor contenido de humedad.

6.3.5 Módulo de elasticidad dinámico

Para la determinación del módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR se emplearon las mismas muestras cilíndricas que las utilizadas para la determinación de la velocidad ultrasónica y la resistencia a compresión. Se determinó la frecuencia fundamental de resonancia utilizando un equipo electrónico con un rango de frecuencia que oscila entre 10 kHz y 100 kHz. De igual modo, se hicieron las determinaciones correspondientes a los hormigones HC. En todos los casos, se siguieron los lineamientos establecidos en la normativa Argentina [*Norma IRAM 1693*].

En la Figura 6.28 se presentan los módulos de elasticidad dinámico obtenidos sobre los distintos hormigones HR-A elaborados con cada una de las doce muestras de AGR pertenecientes a la Serie A. Cada punto surge del promedio de tres determinaciones.

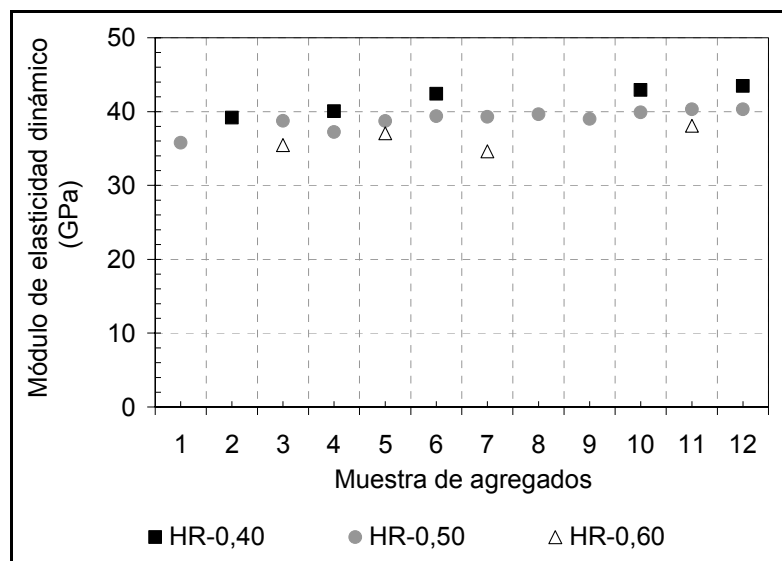


Figura 6.28 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-A.

En este caso, los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos en los HR-A de igual razón a/c presentan un comportamiento similar al mostrado por la velocidad ultrasónica, aunque su variación resultó menor. Se verifica que en el caso de la muestra 7, el módulo dinámico también resultó inferior para el hormigón HR-0.60 producto de la menor densidad que presentó dicho agregado.

Los valores medios de los módulos de elasticidad dinámico determinados sobre los hormigones HR-A, comparativamente con los obtenidos sobre los correspondientes HC, se presentan en la Figura 6.29 (Ver Tabla II.1 del Anexo II). En los HR-A se obtuvieron desvíos estándar (s) de 1.9, 2.1 y 1.4 GPa mientras que en los HC los valores de s fueron 4.2, 3.2 y 2.2 GPa para las razones a/c 0.40, 0.50 y 0.60. Los correspondientes coeficientes de variación (δ) resultaron ser 4.5, 5.3 y 3.8 % para los HR-A y 9.1, 7.0 y 5.2 % para los HC.

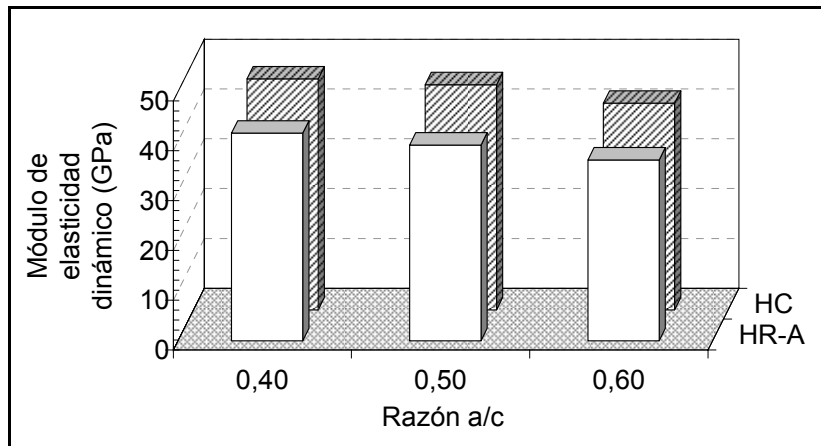


Figura 6.29 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-A y HC.

De manera similar al ensayo de ultrasonido, en este caso también se observa una disminución de los módulos dinámicos de los HR-A respecto a los del HC, para cada razón a/c evaluada, la cual resulta del orden del 12 % en promedio. Dicha disminución es atribuida a la menor densidad que posee el agregado grueso reciclado. Por otro lado, la variación del módulo dinámico de los hormigones HR-A con la razón a/c resulta similar a la que se produce en el hormigón HC.

Los módulos de elasticidad dinámico determinados sobre el hormigón convencional y sobre los diferentes hormigones elaborados en los cinco ciclos de reciclado (HR-B) se presentan en la Figura 6.30. (Ver Tabla II.2 del Anexo II)

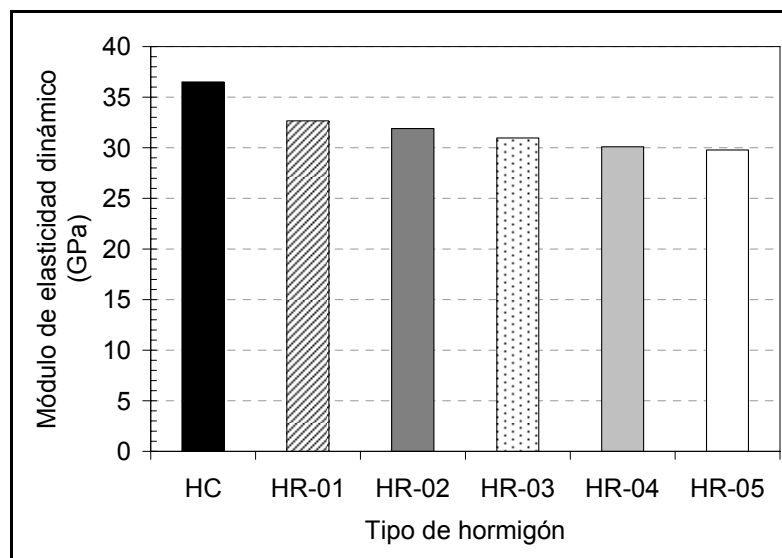


Figura 6.30 – Módulo de elasticidad dinámico de los hormigones HR-B y HC.

A diferencia de lo observado en el caso de la velocidad ultrasónica, en este caso se produce una continua disminución del módulo dinámico a medida que aumenta el número de ciclos, resultando más evidente para el primero de ellos (11 %) y disminuyendo de manera relativa para los posteriores, 13 % para el segundo, 15 % para el tercero y 18 % para el cuarto y quinto ciclo, todos con relación al hormigón original. Este hecho es atribuido a la menor densidad que presentan los AGR de la Serie B conforme avanza el número de ciclos de reciclado.

6.3.6 Resistencia al quebramiento - Presión Break-Off

El ensayo Break-Off [*Norma ASTM C 1150-90*] constituye uno de los Ensayos Semi-Destructivos que permite cuantificar “in situ” la resistencia a flexión del hormigón. Para ello se materializa en el elemento estructural en estudio un cilindro de dimensiones preestablecidas, el cual permanece empotrado a la estructura en un extremo y libre en el otro, determinándose la presión (carga) que produce su rotura.

La materialización del cilindro de ensayo, cuyas dimensiones son 55 mm de diámetro y 70 mm de altura, se realizó mediante una broca diamantada de diseño especial (Figura 6.31), permitiendo calar el testigo cilíndrico propiamente dicho a la vez que deja una base donde apoya la celda de carga (Figura 6.32).

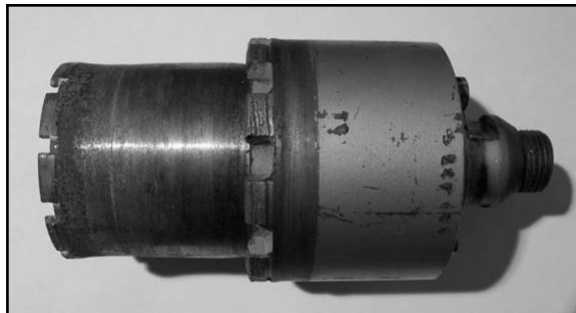


Figura 6.31 – Broca diamantada.

Dicho dispositivo de ensayo (celda de carga) consiste fundamentalmente en un cilindro con un sector de círculo móvil el cual mediante un sistema hidráulico accionado manualmente produce una presión que se registra en un manómetro, una vez que se produce la rotura del cilindro. En la Figura 6.33 se presenta una fotografía del equipo Break-Off.

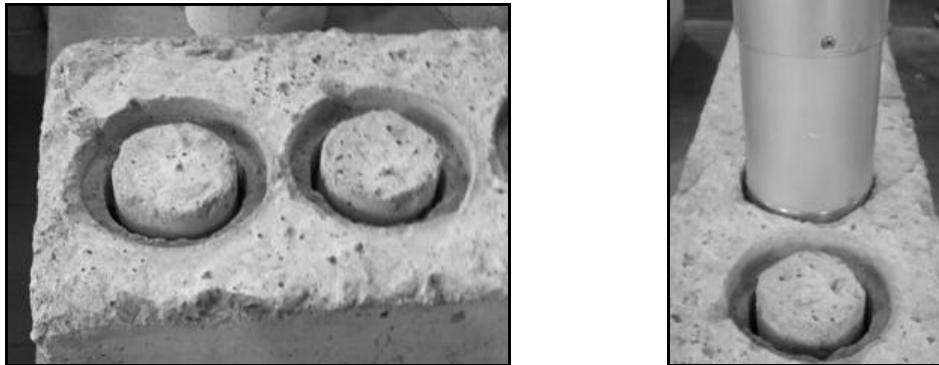


Figura 6.32 – Testigo calado y base para apoyo de la celda de carga del ensayo Break-Off.



Figura 6.33 – Celda de carga, válvula de presión y manómetro del equipo Break-Off.

El ensayo Break-Off se realizó con un equipo marca Scancem, que posee un rango de presión de 16 MPa y una precisión de lectura de 0.2 MPa. Las determinaciones se realizaron manteniendo el equipo en el nivel superior de presión (Nivel H: hormigones con un nivel resistente de hasta 75 MPa), aplicando la carga hasta alcanzar la rotura del material a razón de 0.2 MPa/s.

Los cilindros de ensayo fueron materializados según se describió anteriormente sobre la cara de moldeo de vigas de 150 x 150 x 900 mm, elaboradas con cada uno de los hormigones HR-A y HC en estudio.

En la Figura 6.34 se presenta la variación de la presión Break-Off con la razón a/c, para los distintos hormigones HR-A y HC. Cada punto del gráfico resulta del promedio de al menos cinco determinaciones. Los resultados se informan en la Tabla II.1 del Anexo II.

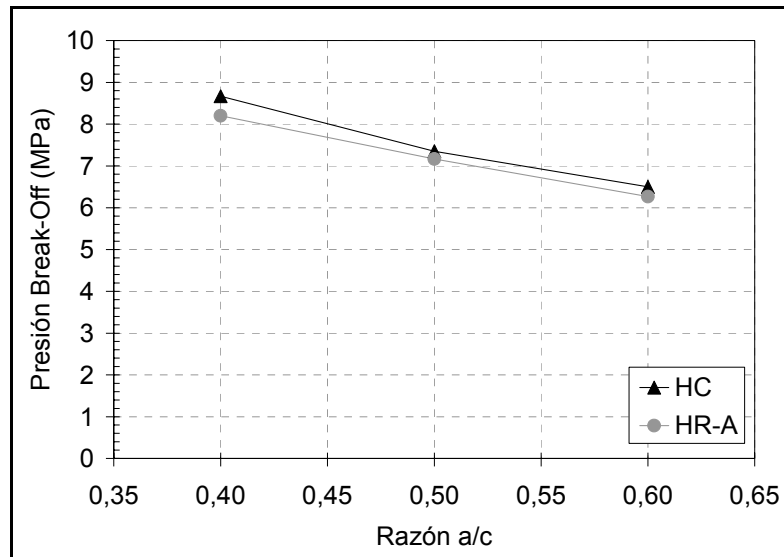


Figura 6.34 – Variación de la presión Break-Off con la razón a/c.

Puede observarse que, para las tres razones a/c estudiadas, los valores de presión Break-Off obtenidos para los hormigones HR-A son similares a los obtenidos en los HC, presentando en cada caso coeficientes de variación del orden del 3 % y 5 % respectivamente.

Este comportamiento puede ser atribuido a una mejora en la zona de interfase mortero – agregado reciclado como consecuencia de la mayor rugosidad superficial y porosidad que presentan estos últimos.

Capítulo 7

CONSIDERACIONES FINALES

Capítulo 7

CONSIDERACIONES FINALES

7.1 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los estudios realizados sobre diferentes muestras de agregados gruesos reciclados (AGR), procedentes de la trituración de hormigones de desecho desconocidos (Serie A) y de la realización de cinco ciclos de reciclado (Serie B), como así también de aquellos correspondientes a los diferentes hormigones reciclados (HR-A y HR-B) con ellos elaborados, en donde el agregado grueso natural (AGN) fue reemplazado por el AGR en un 75 % en volumen, surgen las siguientes conclusiones:

- ✓ Los agregados gruesos reciclados generados a partir de la trituración de hormigones de desecho, mediante el empleo de una trituradora de mandíbulas, presentan una distribución granulométrica que los hace aptos para su empleo en la elaboración de hormigones, ubicándose dentro de los límites establecidos en la Norma IRAM 1627 para agregados gruesos naturales de igual tamaño máximo.
- ✓ La presencia de mortero como parte de los agregados gruesos reciclados produce modificaciones en sus propiedades con relación a las del agregado grueso natural. De los doce muestreos realizados en la Serie A surge que la presencia del mortero en los AGR tiene mayor influencia sobre algunas propiedades, presentando una menor densidad y mayor capacidad de absorción de agua y desgaste “Los Angeles”.
- ✓ En la mayoría de los AGR de la Serie A, el porcentaje de material que pasa el tamiz IRAM de 75 μm es inferior al límite máximo establecido en el Reglamento CIRSOC 201 para agregados gruesos naturales de trituración. Sin embargo, es recomendable proceder al lavado de los mismos previo a su utilización.

- ✓ Debido a que los agregados gruesos reciclados presentan mortero adherido a las partículas del agregado grueso natural, hecho que modifica la forma de los mismos, tanto el índice de lajas como de elongación fueron inferiores a los de los agregados gruesos naturales utilizados (piedra partida granítica).
- ✓ En el ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio, los agregados gruesos reciclados presentaron valores de pérdida muy superiores al límite admitido para los agregados gruesos naturales. Este comportamiento debe atribuirse a la elevada porosidad que poseen los agregados gruesos reciclados.
- ✓ Los AGR-B presentan una importante disminución en la calidad de sus propiedades, principalmente en los dos primeros ciclos, manteniéndose luego prácticamente constantes hasta el quinto ciclo de reciclado. Este hecho debe ser atribuido al mayor contenido de mortero de los AGR conforme aumenta el número de ciclos como así también al porcentaje (75 %) de reemplazo utilizado.
- ✓ Un punto sobresaliente a tener en cuenta al momento de evaluar los agregados gruesos reciclados, y más aún al emplearlos en la elaboración de nuevos hormigones, es que los resultados obtenidos en las distintas propiedades físico-mecánicas y durables evaluadas corresponden a muestras constituidas por 100 % de AGR, los cuales resultarán más próximos a los correspondientes a los AGN cuando las determinaciones se realicen sobre el conjunto granular AGN-AGR, y más aún cuanto menor sea el porcentaje de agregado reciclado empleado.
- ✓ El empleo de los agregados gruesos (naturales y reciclados) en estado saturado conduce a que los asentamientos determinados en los hormigones HC y HR elaborados con las diferentes muestras resulten similares entre sí. Los pesos por unidad de volumen muestran también una baja variación para cada hormigón HR. Los porcentajes de aire naturalmente incorporado en los hormigones HR resultaron similares a los de los hormigones HC.
- ✓ La densidad de los HR-A resulta inferior a la de los HC, mientras que la absorción de agua y la porosidad son superiores en los HR-A, siendo dichos incrementos mayores cuanto menor es la razón a/c del hormigón. En el caso de los ciclos de reciclado, tanto la densidad como la absorción de agua y la porosidad de los HR-B sufren importantes modificaciones para los dos primeros ciclos manteniéndose luego aproximadamente constantes. Dicho comportamiento es atribuido a la

menor densidad y mayor absorción del agregado reciclado, como así también al elevado porcentaje de reemplazo utilizado.

- ✓ Las resistencias a compresión (f_c) de los HR-A correspondientes a cada una de las razones a/c evaluadas son semejantes a las de los HC, motivo por el cual la relación f_c -a/c resulta prácticamente la misma. Asimismo, los valores de desvío estándar obtenidos en los HR-A, para cada una de las razones a/c evaluadas, resultan similares a los hallados en los HC.
- ✓ Los hormigones HR-B, correspondientes a los cinco ciclos de reciclado, presentan similares valores de resistencia a compresión durante todos los ciclos realizados, a pesar que las propiedades de los agregados gruesos reciclados disminuyen en cada ciclo.
- ✓ El módulo de elasticidad estático de los HR-A es inferior al de los HC en un 12 %, debido a la mayor deformabilidad de los agregados reciclados motivada por la presencia de un mayor contenido de mortero. Los HR-B, correspondientes a los cinco ciclos de reciclado, presentan una continua disminución del módulo estático con cada nuevo ciclo, siendo más importante en el primero de ellos (18 %) y haciéndose prácticamente constante en los últimos.
- ✓ La velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad dinámico de los HR-A son inferiores al de los HC para cada una de las razones a/c estudiadas, hecho que debe ser atribuido fundamentalmente a la menor densidad que presentan los AGR. Los resultados obtenidos en cada hormigón presentan una baja dispersión en cada uno de dichos ensayo.
- ✓ Los hormigones HR-B presentan una continua disminución de la velocidad del pulso ultrasónico y del módulo dinámico conforme avanza el número de ciclos de reciclado. Dicha disminución es más importante en los primeros dos ciclos y resulta prácticamente despreciable para los últimos, lo cual pone en evidencia la variación obtenida en el ensayo de densidad, tanto de los AGR de la Serie B como de los hormigones con ellos elaborados.
- ✓ Si bien algunas de las propiedades evaluadas sobre los AGR de la Serie A presentan una variación importante, la misma no se ve reflejada en los hormigones con ellos elaborados (HR-A).

- ✓ La presión Break-Off de los hormigones HR-A es similar a la de los HC para las tres razones a/c estudiadas. Este hecho puede ser atribuido a una mejora en la zona de interfase mortero – agregado reciclado como consecuencia de la mayor rugosidad superficial y porosidad que poseen dichos agregados.

7.2 ESTUDIOS FUTUROS

La presente Tesis constituye un aporte al conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas y durables que presentan los agregados gruesos reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho. Sin embargo, existen muchas variables que influyen sobre las características de los hormigones convencionales y que pueden ser consideradas en futuras investigaciones sobre los hormigones reciclados. En tal sentido, se presentan algunas de ellas:

- Continuar con la evaluación de las propiedades físicas, mecánicas y durables de los agregados gruesos reciclados resultantes de la trituración de hormigones de desecho, tanto de procedencia conocida como de aquellos cuyas características tecnológicas se desconozcan, con el fin de estudiar la influencia que puede tener el tipo de agregado natural sobre las mismas.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho, comparativamente con las determinadas sobre las arenas naturales de río como así también sobre las arenas naturales de trituración. Esta situación resulta de gran interés debido a la escasez de yacimientos de arenas naturales de río con módulo de finura aceptable, y a la no existencia en algunas regiones de arenas utilizables.
- Estudiar las propiedades en estado fresco de los hormigones reciclados elaborados con distintos porcentajes de agregado reciclado, grueso y/o fino, y con el empleo de aditivos plastificantes y superplastificantes.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de hormigones reciclados de distintas razones a/c elaborados con agregados reciclados, gruesos y fundamentalmente finos, provenientes de la trituración de hormigones de desecho elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales.

- Estudiar las modificaciones que puede provocar la presencia de los agregados reciclados sobre los parámetros que miden diferentes Ensayos No Destructivos, comparativamente con hormigones convencionales.
- Evaluar las propiedades de transporte a través de la estructura porosa del hormigón, las cuales se hallan fuertemente vinculadas con la durabilidad de los hormigones reciclados, elaborando mezclas de distintas razones agua/cemento y empleando agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones tanto desconocidos como de otros elaborados con diferentes agregados naturales.
- Determinar los perfiles de ingreso de cloruros, solubles y totales, sobre hormigones reciclados de diferentes características tecnológicas, tanto cuando son sumergidos en solución de cloruro de sodio como así también cuando son estacionados en atmósfera marina natural.
- Estudiar el comportamiento durable de hormigones reciclados expuestos a diferentes fenómenos físicos (ciclos alternados de congelación y deshielo, ciclos alternados de humedecimiento y secado) y químicos (ataque por sulfatos, reacción álcali-sílice).
- Evaluar la evolución de los procesos de corrosión, tanto en laboratorio como “in situ”, en barras de acero embebidas en hormigones reciclados de diferentes características, por medio de mediciones de potencial y velocidad de corrosión.
- Estudiar y analizar los parámetros vinculados con la deformabilidad de los hormigones reciclados al ser sometidos a cargas de corta duración (extensibilidad), como así también a cargas sostenidas en el tiempo (contracción y creep).

Capítulo 8

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Capítulo 8

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

8.1 BIBLIOGRAFIA

ACI Committee 555R-01. 2002. Removal and reuse of hardened concrete. Materials Journal, ACI, N° 99-M31, May-June 2002, pp. 300-323.

Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and Concrete Composites, Vol. 24, N° 2, 2002, pp. 269-279.

Anejo 19. 2006. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados. Comisión Permanente del Hormigón, España. (Disponible en www.fomento.es)

Buttler, A.M. 2003. Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. Tesis de Magíster, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, 199p.

Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R. 2002. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. Materials and Structures, Vol. 35, N° 252, September-October 2002, pp. 504-509.

CIRSOC 201. 1982. Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado. Tomo I.

Cúneo Simian, H.A., Durán, M.G. 1995. Propiedades mecánicas y físicas de hormigones con agregados reciclados. Memorias XII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, AATH, Junio 1995, La Plata, Argentina, pp. 291-304.

Di Maio, A., Giaccio, G., Zerbino, R. 2002. Hormigones con agregados reciclados. Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N° 9, pp. 5-10.

Di Maio, A.A., Gutiérrez, F., Traversa, L.P. 2001. Comportamiento físico mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados. Memorias 14° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, AATH, Octubre 2001, Olavarría, Argentina, pp. 37-44.

Gómez, J.M., Agulló, L., Vázquez, E. 2001. Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto. Construcción y Tecnología, Vol. XIII, N° 157, Junio 2001, pp. 10-20.

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, 2002, pp. 1301-1311.

Grübl, P., Rühl, M. 1998. German Committee for Reinforced Concrete (DafStb) – Code: Concrete with Recycled Aggregates. Proc. Int. Symposium Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregates. University of Dundee, London. (Available in www.b-i-m.de)

Hansen, T.C. 1986. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second State-of-the-art. Report developments 1945-1985. RILEM Technical Committee-37-DRC, Demolition and Recycling of Concrete. Materials and Structures, Vol. 19, N° 111, 1986, pp. 201-246.

Hansen, T.C., Narud, H. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International, Vol. 5, N° 1, January 1983, pp. 79-83.

Hernández, C., Fornasier, G. 2005. Caracterización de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado. Memorias Symposium *fib* "Structural Concrete and Time", Septiembre 2005, La Plata, Argentina, pp. 833-840.

Kasai, Y. 2005. Recent trends in recycling of concrete waste and use of recycled aggregate concrete in Japan. En SP219: Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable development. ACI International, Ed. Tony C. Liu and Christian Meyer. pp. 11-34.

Katz, A. 2003. Properties of Concrete made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, N° 5, 2003, pp. 703-711.

Lauritzen, E.K. 2005. Recycling concrete – An overview of challenges and opportunities. En SP219: Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable development. ACI International, Ed. Tony C. Liu and Christian Meyer. pp. 1-10.

Leite, M.B., Pedrozo, P.H., Dal Molin, D.C.C., 2000. Agregado reciclado para concreto: proposta de desenvolvimento de um método para determinação da taxa de absorção do material. IBRACON 2000, 42º Congresso Brasileiro del Hormigón, Agosto 2000, Fortaleza, Brasil.

Limbachiya, M.C., Leelawat, T., Dhir, R.K. 2000. Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete. *Materials and Structures*, Vol. 33, N° 233, 2000, pp. 574-580.

Machado, E.F., Latterza, L.M. 1997. Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de residuos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur, Agosto 1997, Santa Fé, Argentina, pp. 207-218.

Malhotra, V.M. 2002. Introduction: Sustainable development and concrete technology. *Concrete International, ACI*, Vol. 24, N° 7, July 2002, p. 22.

Metha, P.K. 2002. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International, ACI*, Vol. 24, N° 7, July 2002, pp. 23-28.

Norma ASTM C 1150:1990. Standard Test Method for the Break-Off Number of Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, ASTM International, West Conshonocken, PA.

Norma ASTM C 469:1987. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, ASTM International, West Conshonocken, PA.

Norma ASTM C 642:1990. Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Norma IRAM 1501-2:2002. Tamices de ensayo. Tela de tejido metálico, chapa metálica perforada y lámina electroformada. Tamaños nominales de abertura. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1505:2003. Agregados. Análisis granulométrico. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1525:1985. Agregados. Método de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1532:2000. Agregados gruesos. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina "Los Ángeles". Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1533:2002. Agregados Gruesos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1534:2004. Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1536:1978. Hormigón fresco de cemento portland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1540:2004. Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm , por lavado. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1546:1992. Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1562:1978. Hormigón fresco de cemento portland. Método de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de aire. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1602-1:1988. Hormigón de cemento portland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros. Parte 1: Método A. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1627:1997. Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1661:1970. Hormigones. Método de ensayo de la resistencia a la congelación en aire y deshielo en agua. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1683:1990. Hormigón de cemento portland. Método para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1687:1996. Agregados. Parte 1: Método de determinación del índice de lajidad. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1687:1997. Agregados. Parte 2: Determinación del índice de elongación. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Norma IRAM 1693:1969. Hormigones. Método de determinación de las frecuencias fundamentales de vibración de probetas de hormigón. Instituto Argentino de Normalización, Argentina.

Olorunsogo, F.T., Padayachee, N. 2002. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. Cement and Concrete Research, Vol. 32, N° 2, 2002, pp. 179-185.

Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C. 2004. 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, 2004, pp. 31-36.

Rasheeduzzafar, Asfahanullah Khan. 1984. Recycled concrete - A source for new aggregate. *Cement, Concrete and Aggregate*, ASTM, Vol. 6, N° 1, 1984, 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*, Vol. 27, 1994, pp. 557-559.

Sánchez de Juan, M., Alaejos Gutiérrez, P. 2003. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, 2003.

Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T. 1985. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, N° 130, March 1985, pp. 29-38.

Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y.H., Tam, C.T. 1987. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, N° 141, December 1987, pp. 214-220.

Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y.H., Tam, C.T. 1988. Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests. *Materials and Structures*, Vol. 21, N° 124, 1988, pp. 289-295.

Tavakoli, M., Soroushian, P. 1996. Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, ACI, March-April 1996, pp. 182-190.

Topcu, I.B., Sengel, S. 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, N° 8, 2004, pp. 1307-1312.

Vázquez, E., Barra, M. 2002. Reciclaje y reutilización del hormigón. Monografía CIMNE: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón, N° 67. Octubre 2002. pp. 43-65.

Anexo I

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LOS AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

Anexo I

Resultados obtenidos sobre los Agregados Gruesos Reciclados

Tabla I.1 – Granulometrías de los AGR de la Serie A.

Muestra de AGR	Pasa acumulado (%)				
	Abertura de tamiz (mm – pulg.)				
	25.4 – 1"	19.0 – 3/4"	12.7 – 1/2"	9.5 – 3/8"	4.75 – N° 4
1	100	71	38	26	4
2	100	78	40	23	1
3	100	76	43	28	3
4	100	75	43	30	5
5	100	78	44	29	5
6	100	65	33	22	1
7	100	66	27	16	2
8	100	74	44	32	5
9	100	78	43	29	4
10	100	72	35	23	2
11	100	64	29	17	1
12	100	74	47	33	5

Tabla I.2 – Granulometrías de los AGR de la Serie B.

Tipo de AGR	Pasa acumulado (%)				
	Abertura de tamiz (mm – pulg.)				
	25.4 – 1"	19.0 – 3/4"	12.7 – 1/2"	9.5 – 3/8"	4.75 – N° 4
AGR-01	100	80	52	37	4
AGR-02	100	89	51	26	4
AGR-03	100	81	41	24	2
AGR-04	100	90	57	30	1
AGR-05	100	84	56	33	3

Tabla I.3 – Propiedades de los AGR de la Serie A.

Muestra de AGR	Propiedades				
	Módulo de Finura	Densidad	Absorción (%)	Desgaste “Los Angeles” (%)	Pasa tamiz IRAM 75 μ m (%)
1	6.97	2.46	4.4	39.9	2.31
2	6.98	2.46	4.5	34.8	3.41
3	6.92	2.48	3.9	37.8	0.28
4	6.87	2.48	4.1	40.4	0.58
5	6.83	2.47	4.7	37.8	0.14
6	7.09	2.47	4.0	35.1	0.27
7	7.16	2.43	5.5	40.5	0.06
8	6.88	2.45	4.8	40.1	0.54
9	6.87	2.44	5.2	38.4	0.10
10	7.03	2.46	5.0	37.1	1.12
11	7.18	2.45	4.8	38.5	0.18
12	6.87	2.46	4.4	37.9	0.11

Tabla I.4 – Propiedades de los AGR de la Serie B.

Tipo de agregado	Propiedades			
	Módulo de Finura	Densidad	Absorción (%)	Desgaste “Los Angeles” (%)
AN	6.73	2.70	0.4	25.0
AGR-01	6.78	2.46	4.4	36.4
AGR-02	6.79	2.41	5.9	45.5
AGR-03	6.92	2.37	6.9	47.8
AGR-04	6.79	2.34	7.7	46.9
AGR-05	6.78	2.35	7.7	49.2

Anexo II

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE LOS HORMIGONES RECICLADOS

Anexo II

Resultados obtenidos sobre los Hormigones Reciclados

Tabla II.1 – Valores medios de las propiedades de los hormigones HR-A.

Propiedades	Razón a/c					
	0.40		0.50		0.60	
	HC	HR-A	HC	HR-A	HC	HR-A
Absorción (%)	5.3	7.2	5.8	7.4	6.0	7.7
Densidad D _{ss}	2.43	2.34	2.39	2.32	2.37	2.29
Densidad D _s	2.30	2.18	2.26	2.16	2.24	2.13
Porosidad (%)	12.2	15.6	13.0	16.1	13.4	16.3
Resistencia a compresión (MPa)	33.5	33.1	24.1	23.6	18.1	17.9
Módulo de elasticidad estático (GPa)	35.4	31.4	32.7	28.3	30.0	26.3
Velocidad del pulso ultrasónico (km/s)	4.63	4.45	4.55	4.30	4.48	4.21
Módulo de elasticidad dinámico (GPa)	46.4	41.7	45.2	39.3	41.5	36.3
Presión Break-Off (MPa)	8.7	8.2	7.4	7.2	6.5	6.3

Tabla II.2 – Valores medios de las propiedades de los hormigones HR-B.

Propiedades	Tipo de hormigón					
	HC	HR-01	HR-02	HR-03	HR-04	HR-05
Absorción (%)	5.1	6.6	7.0	7.2	7.4	7.3
Densidad D _s	2.29	2.20	2.15	2.15	2.14	2.16
Porosidad (%)	11.6	14.5	15.0	15.5	15.8	15.8
Resistencia a compresión (MPa)	25.6	25.4	26.4	27.3	25.5	25.7
Módulo de elasticidad estático (GPa)	33.7	27.7	26.6	25.9	25.1	24.6
Velocidad del pulso ultrasónico (km/s)	4.73	4.38	4.23	4.22	4.25	4.30
Módulo de elasticidad dinámico (GPa)	36.5	32.7	31.9	31.0	30.1	29.8

Tabla II.3 – Resistencias a compresión de los hormigones HR-A.

Muestras	Razón a/c		
	0.40	0.50	0.60
1	36.7	25.9	19.4
2	36.9	26.6	18.7
3	36.8	26.0	18.2
4	32.0	25.8	18.8
5	33.0	26.3	19.3
6	33.1	27.5	19.3
7	31.3	22.2	16.8
8	31.4	23.8	16.5
9	32.0	22.2	15.6
10	32.9	23.6	15.7
11	34.4	23.6	18.3
12	33.5	23.7	18.4
13	-	24.6	17.5
14	-	24.3	-
15	-	24.9	-
16	-	24.0	-
17	-	22.0	-
18	-	22.4	-
19	-	23.0	-
20	-	23.6	-
21	-	24.7	-
22	-	23.9	-
23	-	24.3	-
24	-	22.3	-
25	-	21.4	-
26	-	22.2	-
27	-	23.2	-
28	-	22.9	-
29	-	22.5	-
30	-	21.2	-
31	-	22.3	-
32	-	23.4	-
33	-	22.9	-
34	-	21.1	-
35	-	21.9	-