

**Estudio de la contracción por secado en
morteros y hormigones elaborados con agregados
finos reciclados**

Tesis doctoral presentada por

María Eva Sosa

**Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad
Nacional de La Plata para acceder al grado académico de**

Doctor en Ingeniería

Director: Ing. Ángel Antonio Di Maio

Codiretor: Dr. Ing. Claudio Javier Zega

Agradecimientos

Empiezo estas líneas disculpándome por no lograr expresar con exactitud la gratitud que siento por los que en este camino me han acompañado. Mi dominio del lenguaje impide que los siguientes agradecimientos se acerquen siquiera al profundo sentir que intentare expresar a continuación.

En primer lugar, expreso mi más sincero y profundo agradecimiento al Ingeniero Ángel Di Maio no sólo por la dedicación en la dirección del presente trabajo de tesis, sino y más que todo por el afecto, la paciencia y los consejos brindado que me han formado no sólo como profesional sino como persona. José Hernández escribe en Martín Fierro: Un padre que da consejo, más que padre es un amigo. Análogamente podría decirse que un “Jefe” que da consejos más que jefe es un amigo. Personalmente creo que la palabra amigo no alcanza a describir el afecto y aprecio con que lo considero. Gracias Infinitas.

Al Dr. Ingeniero Claudio Zega además de mi agradecimiento por la predisposición, colaboración e infinita paciencia con la que me ha dirigido durante el desarrollo de esta tesis, quiero expresarles mis disculpas por los “dolores de cabeza” generados que hoy se manifiestan en sus canas. A él expreso una muy profunda gratitud por tomarse el tiempo y la dedicación para forjar la magnífica relación laboral y casi amistad que nos une.

Al Dr. Ingeniero Yury Villagrán Zaccardi por el tiempo, la dedicación y la invaluable colaboración y aportes realizados para mejorar el presente trabajo de tesis y los consejos permanentes tendientes a mejorar mi desarrollo profesional.

A mis compañeros del LEMIT Dra. Ingeniera María Celeste Torrijos, Pablito, Juan, Lauty, Lea, Gaby y Ale por los almuerzos compartidos, debates, risas y facturas conmemorativas de aniversarios natalicios con los que han hecho muy amenos los años compartidos durante mi paso por el LEMIT.

A los “chicos” de la sala y de ligantes: Javy, Victor, Juan, Agus, especialmente a Guille y Mario por la colaboración brindada en las experiencias realizadas, por los riquísimos asados y desayunos compartidos y fundamentalmente por la buena predisposición, el espíritu colaborativo y el cariño con el que me han tratado.

A mis amigos del LEMIT: Ani y Maxy a quienes agradezco profundamente el apoyo, el “aguante” y los millones de anécdotas, carcajadas y recuerdos de un invaluable aporte que han hecho que mi estancia en el LEMIT se sintiera una sucursal de mi casa. Gracias infinitas a ambos.

A mi familia de sangre especialmente mis sobrinos a mi “hermanita” María y a mi mama “adoptada” por ser una fuente de energía inagotable para enfrentar el desafío que ha representado el presente trabajo de tesis.

A mi otra familia, Ani, Kedo, Noe, Chule, Taz, Carly, Gabita, Marce y Esnu por el apoyo incondicional, la comprensión por las ausencias, los consejos y los momentos

compartidos que han constituido un pilar sin el cual no habría podido materializar el presente estudio.

A mis ex compañeros y jefes de ARBA: Toto, Gaby, Clarita, Dany, Sabri, Vero, Bruno, Rony y muy especialmente a Barny, Marian y Ro por el aliento y el apoyo brindado para que pudiera encarar este desafío personal.

Al Ingeniero Luis Pascual Traversa por permitirme la realización de los estudios experimentales en el LEMT, centro que gracias a la calidad y calidez de la gente que allí trabaja considero mi segundo hogar.

Resumen

La escasez de agregados finos naturales (AFN) aptos para la elaboración de hormigones y el gran impacto ambiental asociado a su explotación han convertido a los agregados finos reciclados (AFRs), fundamentalmente aquellos que provienen de la trituración de hormigones, en una temática de interés creciente en los últimos años.

La pasta de cemento que poseen en su composición los agregados finos reciclados genera una menor densidad y durabilidad y una mayor absorción en comparación con los agregados finos naturales. Estas características de los AFRs pueden modificar el desempeño mecánico, durable y elástico de los hormigones elaborados a partir de ellos en comparación con hormigones convencionales elaborados con AFNs. Sin embargo, no hay un acuerdo generalizado sobre si las modificaciones producidas son beneficiosas o perjudiciales frente a distintas propiedades del hormigón, pudiendo encontrarse una gran cantidad de estudios que concluyen en los dos sentidos. Tales discrepancias pueden atribuirse a las diferentes características del hormigón del cual provienen los AFRs. No obstante, cabe mencionar que dicha afirmación es válida también para el agregado grueso reciclado, sobre el cual existe consenso sobre su viabilidad técnico-económica para la elaboración de hormigones.

El objetivo general del presente trabajo de tesis consiste en estudiar el comportamiento frente a la contracción por secado de morteros y hormigones elaborados con un 30% (en volumen) de agregados finos reciclados (AFRs) procedentes de la trituración de hormigones. Para lograr dichos objetivos se establecieron como variables de estudio la mineralogía del agregado grueso natural (AGN) y la relación a/c del hormigón de origen, así como también la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs durante la dosificación. Con el fin de cumplir los objetivos planteados se elaboraron hormigones patrones de relaciones agua-cemento (a/c) 0,40 y 0,55 y dos mineralogías de agregados gruesos naturales (AGNs) granítica y cuarcítica y 30% en volumen de arenas de trituración (AFT) de igual mineralogía que el AGN empleado. Los AFRs utilizados se obtuvieron de la trituración y tamizado de los hormigones patrones anteriormente mencionados, obteniendo así dos calidades de AFR por cada mineralogía de AGN utilizado (en correspondencia con las dos relaciones a/c utilizadas). Con cada AFR se elaboraron morteros y hormigones de relación a/c 0,40 y 0,55 con el mismo porcentaje en el que se

utilizaron los AFT. Para considerar la absorción de los AFRs dos metodologías fueron utilizadas; una de ellas consistió en adicionar al agua de mezclado el 80% de la absorción de los AFRs. La otra metodología consistió en elaborar los hormigones sin incorporar agua adicional empleando la dosis de aditivo reductor de agua necesaria para obtener un mismo nivel de consistencia que en el patron.

La contracción por secado de los morteros y hormigones elaborados con AFRs se evaluó comparativamente con aquella obtenida en los morteros y hormigones elaborados con AFN mediante el estacionamiento de las muestras bajo estudio en condiciones de humedad y temperatura controladas (HR: $50 \pm 5\%$; T: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) desde la finalización del curado hasta la edad de 365 días. Complementariamente, otras propiedades tales como asentamiento, peso unitario, contenido de aire, exudación, resistencias mecánicas, módulo de elasticidad, absorción de agua y velocidad y capacidad de succión capilar fueron evaluadas.

De los resultados obtenidos surge que las propiedades habitualmente evaluadas en los AFR tales como densidad, absorción de agua y contenido de pasta no resultaron sensibles frente a las variables estudiadas. Otras propiedades como la durabilidad frente al ataque por sulfatos y porosidad exhibieron una relación directa con el nivel resistente del hormigón del cual provienen los AFRs.

El nivel resistente, la mineralogía del agregado en el hormigón de origen, así como la forma en que se consideró la absorción de los AFRs en la dosificación no resultaron variables determinantes respecto del asentamiento, la densidad y la resistencia a compresión de los morteros elaborados presentando un comportamiento similar al obtenido en los patrones.

En los hormigones reciclados, propiedades tales como la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la porosidad y los parámetros de succión capilar se encontraron relacionados directamente con la relación a/c total y no exhibieron ninguna relación con la razón a/c efectiva. La influencia de las variables bajo estudio resultó secundaria respecto de las propiedades mencionadas.

La contracción por secado en los morteros con AFRs graníticos resultó mayor que la del patrón en tanto que en los cuarcíticos fue similar. Se evidenciaron diferencias en los mecanismos de secado como consecuencia del empleo del AFR. En el caso de los

hormigones, la contracción por secado fue similar a la del patrón al emplear los AFRs graníticos y ligeramente inferior al utilizar los AFRs cuarcíticos.

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis es posible concluir que a excepción de la consistencia, las propiedades de hormigones reciclados, al igual que en los convencionales, resultan determinadas principalmente por la relación a/c total. El nivel resistente del hormigón de origen no exhibió una influencia significativa frente a las propiedades del estado fresco y endurecido de los hormigones. La mineralogía del agregado en el hormigón de origen resultó en una influencia secundaria en dichas propiedades. La contracción por secado no se modifica en términos significativos al emplear AFRs.

In recycled concretes, properties such as compressive strength, modulus of elasticity, porosity and sorptivity could be directly related to the total a/c ratio and exhibited no relationship with the effective a/c ratio. The influence of the studied variables was secondary on the mentioned properties.

The drying shrinkage in mortars with granitic AFRs was greater than that of the pattern, while in the quartzite mortars it was similar. Differences in drying mechanisms were evidenced as a result of the use of AFR. In the case of concrete, the shrinkage by drying was similar to that of the pattern when using granitic AFRs and slightly lower when using quartzitic AFRs.

Based on the results obtained in this thesis work it is possible to conclude that, except for the consistency, the properties of recycled concretes, as in conventional ones, are determined mainly by the total a/c ratio. The compressive strength level of the source concrete did not exhibit a significant influence on the properties of the fresh and hardened state of concretes. The mineralogy of the aggregate in the concrete of origin resulted in a secondary influence on above mentioned properties. The shrinkage by drying is not modified in significant terms when using AFRs.

Abstrac

The shortage of natural fine aggregates (AFN) suitable for making concrete and the great environmental impact associated with their exploitation have converted the recycled fine aggregates (AFRs), mainly those that come from the crushing of concrete, in a topic of growing interest in recent years.

The cement paste present which compounds the fine aggregates recycled generates a lower density and durability and a higher absorption in comparison with the fine natural aggregates. These features of the AFRs can modify the mechanical, durable and elastic performance of the concretes made with them in comparison with conventional concretes made with AFNs. However, there is no general agreement on whether that these modifications produced are beneficial or detrimental to different concrete properties, and a large number of studies can be found that conclude in both sense. Such discrepancies can be attributed to the different characteristics of the concrete from which the AFRs come. However, it should be mentioned that this statement is valid also for the coarse recycled aggregate, on which there is consensus on its technical-economic suitability for the manufacture of concretes.

The general objective of this thesis work is to study the behavior on drying shrinkage on mortars and concretes made with 30% (by volume) of recycled fine aggregates (AFRs) from crushing concretes. To achieve these objectives, the mineralogy of the natural coarse aggregate (AGN) and the a/c ratio of the source concrete were established as study variables, as well as the methodology used to consider the absorption of the AFRs during the mix proportioning. In order to achieve stated objectives, concrete water-cement ratio (a/c) 0.40 and 0.55 and two mineralogies of granite natural aggregates (AGNs) granitic and quartzitic and 30% (by volume) of crushing sand (AFT) of equal mineralogy that the AGN were made. The AFRs used were obtained from crushing and sieving of the aforementioned pattern concretes. Thus, two qualities of AFR for each used AGN mineralogy (corresponding to the two a/c ratios used) were obtained. With each AFR, mortars and concretes with a/c ratio of 0.40 and 0.55 were prepared with the same percentage in which the AFT were used. To consider the absorption of the AFRs two methodologies were used; one of them consisted of adding to the mixing water 80% of the AFRs absorption. The other methodology consisted in making the concretes without adding additional water using the dose of water reducing admixture necessary to obtain the same level of consistency as in the pattern.

The drying shrinkage of mortars and concretes made with AFRs was evaluated comparatively with that obtained in mortars and concretes made with AFN. The samples were kept under controlled humidity and temperature conditions (HR: $50 \pm 5\%$; $20 \pm 2^\circ\text{C}$) from the end of curing to the age of 365 days. In addition, other properties such as slump, unit weight, air content, exudation, mechanical resistances, modulus of elasticity, water absorption and sorptivity were evaluated.

From the obtained results, the properties usually evaluated in AFR such as density, water absorption and paste content were not sensitive to the studied variables. Other properties such as durability against by sulphates attack and porosity exhibited a direct relationship with the compressive strength level of the source concrete.

Compressive strength level, the mineralogy of the aggregate in the source concrete, as well as the way in which the absorption of the AFRs was considered in the proportioning were not determinative variables regarding slump, density and compressive strength of the mortars elaborated presenting similar behavior to that obtained in the patterns.

Índice

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	III
Abstract.....	VI
Índice.....	VII
Nomenclatura y definiciones.....	XII
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1. Objetivo General.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	4
Capítulo II. Estado del arte.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Obtención y tratamiento del agregado fino reciclado.....	6
2.3. Composición del agregado reciclado.....	8
2.3.1. Mortero adherido.....	10
2.3.2. Métodos para la determinación del mortero y/o pasta adherido.....	10
2.3.3. Contenido de mortero y/o pasta adherido en el AFR.....	11
2.4. Forma y textura superficial.....	14
2.5. Distribución de tamaños.....	16
2.6. Densidad.....	17
2.7. Absorción.....	20
2.7.1. Métodos experimentales para la evaluación de la absorción del AR.....	20
2.7.2. Absorción del AFR.....	25
2.8. Durabilidad del AFR.....	28
2.9. Contenido de polvo.....	29
2.10. Recomendaciones y normativa.....	29
2.11. Empleo del AFR en morteros y hormigones.....	30
2.11.1. Métodos de dosificación.....	30
2.11.2. Consistencia.....	32
2.11.3. Aire incorporado.....	36
2.11.4. Peso por unidad de volumen.....	36
2.11.5. Comportamiento mecánico.....	37
2.11.5.1. Resistencia a compresión.....	37
2.11.5.2. Otras resistencias mecánicas.....	44

2.11.6. Módulo de elasticidad estático.....	45
2.11.7. Módulo de elasticidad dinámico.....	47
2.11.8. Durabilidad.....	47
2.12. Contracción por secado.....	49
2.12.1. Contracción por secado en hormigones con agregado fino reciclado.....	55
2.13. Conclusiones.....	56
2.14. Consideraciones Finales.....	58
Capítulo III. Programa Experimental.....	60
3.1. Introducción.....	60
3.2. Materiales.....	61
3.2.1. Agregados gruesos.....	61
3.2.2. Agregados finos.....	62
3.2.2.1. Agregados finos naturales.....	62
3.2.2.2. Agregados finos reciclados.....	62
3.2.3. Otros materiales componentes de las mezclas.....	64
3.3. Morteros.....	64
3.4. Hormigones.....	65
3.4.1. Hormigones Convencionales.....	66
3.4.2. Hormigones Reciclados.....	66
3.5. Síntesis del programa experimental.....	68
3.6. Metodologías de ensayo.....	68
3.6.1. Evaluación de los agregados naturales finos y gruesos.....	68
3.6.2. Evaluación de los agregados finos reciclados.....	69
3.6.3. Evaluación de otros materiales componentes.....	69
3.6.4. Evaluación de Morteros.....	70
3.6.4.1. Ensayos en estado fresco.....	70
3.6.4.2. Ensayos en estado endurecido.....	71
3.6.5. Evaluación de Hormigones.....	71
3.6.5.1. Ensayos en estado fresco.....	71
3.6.5.2. Ensayos en estado endurecido.....	71
Capítulo IV. Caracterización de agregados.....	74
4.1. Introducción.....	74
4.2. Materiales.....	74
4.2.1. Agregados Gruesos.....	74
4.2.2. Agregados Finos Naturales.....	76

4.2.3. Agregados finos reciclados.....	79
4.3. Relación entre propiedades del AFR.....	89
4.3. Análisis comparativo entre AFT y AFR.....	92
4.4. Conclusiones.....	94
Capítulo V. Morteros.....	96
5.1. Introducción.....	96
5.2. Dosificación.....	96
5.3. Estado Fresco.....	100
5.3.1. Extendido.....	100
5.3.2. Asentamiento.....	102
5.3.3. Peso Unitario.....	104
5.4. Estado Endurecido.....	105
5.4.1. Resistencias Mecánicas.....	105
5.4.2. Densidad y porosidad.....	109
5.4.3. Absorción de agua.....	111
5.5. Conclusiones.....	113
Capítulo VI. Hormigones.....	115
6.1. Introducción.....	115
6.2. Dosificación.....	115
6.3. Propiedades en estado fresco.....	117
6.3.1. Asentamiento.....	117
6.3.2. Otras propiedades del estado fresco.....	121
6.4. Estado Endurecido.....	123
6.4.1. Resistencias Mecánicas.....	123
6.4.2. Módulo de elasticidad estático.....	131
6.4.3. Propiedades Durables.....	133
6.4.3.1. Densidad, porosidad y absorción de agua.....	133
6.4.3.2. Succión Capilar.....	135
6.6. Conclusiones.....	141
Capítulo VII. Contracción por secado.....	145
7.1. Introducción.....	145
7.2. Morteros.....	146
7.2.1. Método de ensayo.....	146
7.2.2. Contracción por secado en función del tiempo.....	147
7.2.3. Pérdida de agua en los morteros.....	157

7.2.4. Relación contracción-pérdida de peso.....	164
7.2.5. Relación entre distintas propiedades y la contracción por secado.....	168
7.3. Hormigones.....	171
7.3.1. Método de ensayo.....	171
7.3.2. Contracción por secado en función del tiempo.....	171
7.3.3. Relación entre la contracción del hormigón patrón y los hormigones reciclados	182
7.3.4. Pérdida de agua de los hormigones.....	184
7.3.5. Relación pérdida de agua-contracción por secado.....	189
7.4. Estimación de la contracción por secado.....	193
7.4.1. Introducción.....	193
7.4.2. Método ACI 209.....	193
7.4.3. Método CEB 90.....	194
7.4.4. Estimación de la contracción en los hormigones bajo estudio.....	196
7.5. Relación entre propiedades.....	201
7.6. Relación entre la contracción a diferentes edades.....	204
7.7. Relación entre morteros y hormigones.....	205
7.8. Conclusiones.....	207
Capítulo VIII. Conclusiones.....	213
8.1. Propiedades de los agregados finos reciclados.....	213
8.2. Propiedades de los morteros reciclados.....	214
8.3. Propiedades de los hormigones reciclados.....	216
8.4. Consideraciones finales.....	219
8.5. Estudios futuros.....	223
Referencias bibliográficas.....	225
Anexo I.....	234
Anexo II.....	237

Simbología y abreviaturas

a/c: Relación agua cemento (en peso)	DRX: Difracción de rayos X
Ac: Agua combinada	E: Módulo de elasticidad
AGN: Agregado grueso natural	EMV: Método del volumen de mortero equivalente
AFN: Agregado fino natural	f'c: Resistencia a compresión
AFT: agregado fino de trituración	ff: Resistencia a flexión
AFR: Agregado fino reciclado	HR: Humedad relativa ambiente
AFRC: Agregado fino reciclado cuarcítico	MF: Modulo de finura
AFRG: Agregado fino reciclado granítico	Pc: Peso del cemento anhidro
AFRM: Agregado fino reciclado mixto	PUV: Peso por unidad de volumen
AN: Agregado natural	RI: Residuo insoluble
AR: Agregado Reciclado	s: Desvío estándar
AS: Arena silícea	sss: Estado saturado superficie seca
C-S-H: Silicato de calcio hidratado	SEM:
C2S: Silicato di cálcico	T: Temperatura
C3S: Silicato tri cálcico	Vv: Volumen de vacíos
CV: Coeficiente de variación	

Definiciones

AFR: Agregado fino reciclado. Está constituido mayoritariamente por agregados naturales y pasta de cemento hidratada en proporciones variables

AFRM: Agregado fino reciclado. Está constituido por todo tipo de residuos de la construcción y demolición.

Hormigones reciclados: Hormigones que en su composición presentan distintos porcentajes de agregados reciclados

Hormigones convencionales/ patrones/ de referencia: Hormigones elaborados en su totalidad con agregados naturales.

Relación a/c total: Resulta de dividir la cantidad neta de agua respecto de la de cemento.

Relación a/c efectiva o potencial: Resulta de dividir la cantidad de agua que se encuentra disponible de reaccionar con el cemento δ (agua neta menos agua correspondiente a la absorción de los agregados) respecto de la de cemento.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La degradación ambiental, el riesgo de colapso ecológico, y el avance de la desigualdad y la pobreza son signos elocuentes de la crisis global. La sustentabilidad se presenta como un paliativo obligado para estas problemáticas del mundo globalizado (Leff 1998). En tal sentido, ya en 1972 un informe del Massachusetts Institute of Technology (Meadows et al 1972) consideraba que el agotamiento de las materias primas y la incapacidad del ecosistema terrestre de recuperación de los daños ocasionados, se constituía en un problema al que aún no se le hacía frente. En nuestros días, 45 años más tarde, aún no se ha logrado una concientización universal de la temática y sólo existen esfuerzos puntuales e insuficientes tendientes a mitigar estos efectos.

El desarrollo sustentable es aquel que nos permite atender las necesidades del mundo actual sin dilapidar los recursos de las generaciones futuras (Brundtland 1987). En tal sentido, la sustentabilidad en la construcción se ha convertido en un tópico central de nuestros días debido a la alta participación de recursos no renovables entre las materias primas tradicionalmente requeridas.

En la industria de la construcción la sustentabilidad es abordada desde distintas perspectivas, con focos en el ahorro de consumo energético durante la vida en servicio, el reemplazo de recursos no renovables por otros renovables o la reutilización de residuos y el incremento de la vida útil de las estructuras (Reixach 1998).

El concepto de sustentabilidad implica necesariamente migrar del paradigma actual de economía lineal, basado en extraer recursos-producir-consumir-descartar, a uno de economía circular cuyo objetivo final es, desde la concepción del proyecto, planificar un sistema que permita un eficiente uso de los recursos y donde estos sean reutilizados una y otra vez acabada su vida útil tradicional (Sánchez 2016).

La reutilización de residuos no sólo constituye una respuesta racional en la mejora de la gestión ambiental de la actividad industrial, sino que es una necesidad que puede redundar en beneficios económicos (Mora, 2002). En tanto que, cuanto mayor sea la durabilidad del material, menor será el tiempo y recursos que requiere su mantenimiento.

La construcción sustentable requiere la incorporación de criterios medioambientales desde la concepción del proyecto, en la manera de construir, mantener y “desconstruir” las estructuras (Hendriks, 2000). Para ello, resulta necesaria una clasificación de los residuos mediante demolición selectiva a fin de separar los distintos tipos de materiales que la integran. Esto permite un mayor control del hormigón a triturar a la vez que aumenta las posibilidades de reciclado de los demás materiales presentes en la edificación.

La reutilización de residuos de la construcción y demolición (RCD) proporciona un doble beneficio ambiental, disminuyendo el vertido de estos residuos (mitigando el impacto ambiental asociado a su disposición final) y reduciendo a la vez la necesidad de materia prima para la industria en que se los utilice. Resulta claro entonces el cada vez mayor interés que despierta esta temática a nivel global.

En China, con una población de 1325 millones de personas en el año 2008, los RCD fueron del 40% del total de los residuos sólidos generados (Li 2008). La tasa de reutilización de estos residuos varía según el país considerado. No obstante, en los Países Bajos, así como en Japón la tasa de recuperación ronda el 98% desde el año 2008 (Tam 2009, Florea y Brouwer 2014).

En la Argentina las únicas estadísticas respecto a la generación de residuos provienen del análisis de la gestión de residuos urbanos en pequeños municipios. Es de notar que gran parte de los residuos de la construcción son gestionados por recuperadores urbanos, o son dispuestos en vertederos no controlados con total ausencia del estado tanto en el control como en la legislación. Ello impide la generación de estadísticas que permitan dimensionar la magnitud de los residuos generados.

La falta de controles y estadísticas respecto a los a los RCD contrastan con el creciente interés del sector privado en su aprovechamiento. En tal sentido en el año 2016 y por iniciativa del sector privado se logró el consenso necesario para modificar la norma IRAM 1531, incorporándose un nuevo agregado constituido por una mezcla de al menos 80% de agregado grueso natural y hasta un 20% de agregado grueso reciclado (AGR) proveniente de hormigones que culminaron su vida en servicio.

El empleo de AGR en la industria del hormigón se encuentra normalizado en una gran cantidad de países. Sin embargo, la fracción fina de este residuo que constituye hasta

un 50% del total de agregado reciclado generado (Martins et al 2013) no se encuentra contemplada en la normativa o bien se imponen fuertes restricciones a su empleo.

La necesidad de un tratamiento integral de los agregados reciclados ha llevado a que en los últimos años una gran cantidad de estudios evalúen la influencia del agregado fino reciclado (AFR) sobre diferentes propiedades de morteros y hormigones. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido al evaluar el AGR, la bibliografía no surge consenso sobre la influencia del empleo de los AFRs en el desempeño de los hormigones elaborados.

Por los motivos expuestos resulta necesario conocer exhaustivamente las características físico-mecánicas de los agregados finos reciclados y como éstas se encuentran relacionadas con distintas propiedades de los hormigones de los cuales provienen. Asimismo, resulta de interés también tomar conocimiento sobre la influencia relativa que los mismos suponen frente al desempeño mecánico y durable de los hormigones en los cuales se emplean. Tal conocimiento permitirá un tratamiento integral de los agregados reciclados.

1.1 Objetivo general

La principal diferencia entre los agregados naturales y los reciclados es la presencia de mortero que poseen estos últimos en su composición. Este mortero es responsable de una menor densidad y durabilidad y de una mayor absorción de los AFRs frente a los agregados finos naturales. Estas características de los AFRs lo constituyen como un agregado de calidad inferior respecto a los agregados naturales habitualmente empleados en nuestro país en la industria del hormigón elaborado.

Distintas propiedades del hormigón, tales como su consistencia en el estado fresco, la resistencia, contracción por secado y durabilidad en el estado endurecido podrían ser negativamente afectadas por las características de los AFRs.

En tal sentido, la mayor absorción, el menor módulo de elasticidad y el contenido adicional de pasta que le aporta al hormigón el empleo de AFRs podrían influenciar a la contracción por secado más que a cualquier otra propiedad.

Se plantea entonces como objetivo de esta tesis estudiar el comportamiento de morteros y hormigones elaborados con un 30% (en volumen) de agregados finos reciclados (AFR), procedentes de la trituración de hormigones, frente a la contracción por secado. De

esta forma se podrá realizar un aporte al conocimiento sobre una temática que es prácticamente desconocida a nivel internacional.

1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos se analizarán las posibles modificaciones que pueden provocar en la contracción por secado de morteros y hormigones, diferentes variables tales como la mineralogía y nivel resistente del hormigón de origen, la relación a/c de las mezclas elaboradas, el tipo y calidad del AFR y la metodología empleada para considerar su absorción en la dosificación. Para cumplimentar los objetivos planteados se estudiarán dos relaciones a/c diferenciadas, como así también dos tipos de AFR (graníticos y cuarcíticos) que difieren principalmente en su nivel de absorción; por último se analizará la influencia que puede tener la metodología empleada para la consideración del estado higrométrico de los AFR al momento de su empleo, sobre los cambios volumétricos a través del tiempo. Los resultados que se obtengan serán comparados con los determinados en morteros y hormigones de similares características tecnológicas elaborados con un 30% de agregado fino natural de trituración.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La utilización significativa de los agregados reciclados (AR) data desde fines de la segunda guerra mundial, como consecuencia directa de la gran cantidad de residuos generados, la problemática de su vertido y los escasos recursos naturales disponibles. A partir de allí, y en años subsiguientes, gran diversidad de estudios se enfocaron en los posibles usos de este tipo de agregados, siendo los provenientes de la trituración de hormigón quienes encontraron una factibilidad más propicia para su empleo en la elaboración de nuevos hormigones.

En 1986, Hansen (Hansen 1986) realizó un estado del arte sobre el uso de agregados reciclados provenientes de la trituración de hormigones en la elaboración de nuevos hormigones reportando casos de empleos desde 1964 y hasta 1984. Ya en ese entonces, distintos países (Estados Unidos, Japón, Holanda, Reino Unido y la ex Unión Soviética) poseían normativas específicas para el agregado reciclado, permitiendo en algunos casos su uso en hormigones. Sin embargo, sólo se contemplaba el empleo de la fracción gruesa de dicho residuo por considerar que la fracción fina, debido a su mayor absorción, traería aparejado mermas en la consistencia y la durabilidad de los hormigones.

Desde entonces y hasta hace una década atrás, el uso de AR provenientes de hormigones triturados se limitaba al empleo de la fracción gruesa. Sin embargo, en los últimos diez años, el empleo en hormigones de la fracción fina se ha constituido en una temática de interés a nivel mundial. Este hecho posiblemente se deba a que en la producción del agregado reciclado se genera hasta un 50% de la fracción fina (Martins et al 2013), como así también a la escasez de arenas naturales aptas para la elaboración de hormigones.

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de las características del agregado fino reciclado (AFR), y de la influencia que tiene su empleo sobre distintas propiedades de morteros y hormigones cuando se lo utiliza como reemplazo parcial o total del agregado fino natural.

2.2 Obtención y tratamiento del agregado fino reciclado

La obtención del AR se realiza mediante el procesamiento de los residuos de hormigón, los cuales pueden provenir de diversos orígenes tales como la demolición de estructuras, pavimentos, desechos de la industria de premoldeados, sobrantes de mixer en planta elaboradora de hormigón, etc.

En el caso de hormigones provenientes de estructuras de edificios, es aconsejable que previo a todo procesamiento del AR se realice una demolición selectiva con el fin de separar los distintos tipos de materiales que la integran. Esto permite un mayor control del hormigón a triturar a la vez que aumenta las posibilidades de reciclado de los demás materiales presentes en la edificación.

Los procesos de generación del AR consisten en disminuir el tamaño de los residuos de hormigón mediante trituración, teniendo como fin generar partículas con una distribución de tamaños tal que se adecue a los husos granulométricos establecidos para la elaboración de hormigones.

El procesamiento del AR puede comprender varias etapas siendo la más importante la trituración. En ella pueden intervenir diversos tipos de trituradoras, las cuales operan por distintos mecanismos como impacto, fricción, corte y compresión (Zega 2010). Luego de la trituración se separa el AR en dos fracciones, fina y gruesa, en función de que el tamaño de partículas sea o no menor a 4,75 mm. La separación entre fracciones puede hacerse mediante tamizado o a través de métodos más complejos que separan las fracciones y los distintos tipos de materiales en función de la densidad, empleando corriente de aire o agua.

Diferentes tipos de procesamiento generarán AFR con distintos contenidos de mortero en su composición. Al ser ésta la principal característica que lo diferencia del agregado fino natural (AFN), es esperable que las propiedades del AFR dependan del procesamiento utilizado para su obtención.

Por otra parte, la utilización del agregado grueso reciclado (AGR) en la elaboración de nuevos hormigones ha tenido consenso generalizado respecto de su viabilidad. Ello conlleva a que los procesos de trituración para su obtención tiendan a la generación de un AGR con el menor contenido de mortero adherido posible. Cuanto mayor sea la eliminación del mortero adherido al AGR, mayor será el que integre la fracción fina (Silva et al 2014). Al respecto, Noguchi (2008) encontró que a mayor cantidad de procesos de trituración se incrementa la cantidad de AFR producido (Ver Figura 2.1). El autor además concluye que en función del tipo de tratamiento utilizado será la calidad del agregado obtenido, tal como se esquematiza en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

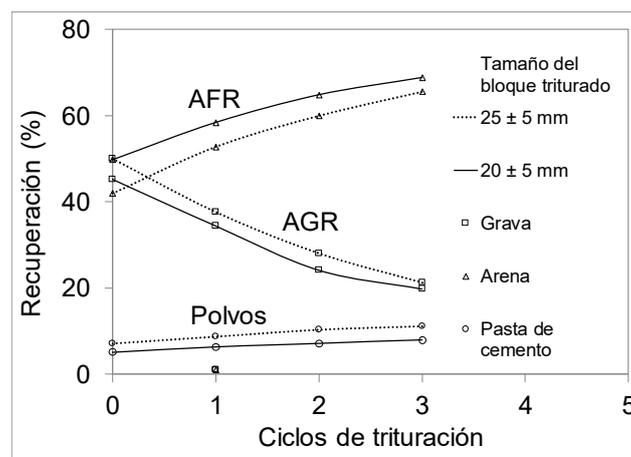


Figura 2.1. Efecto de la trituración repetida en la producción del AR. Adaptado de Noguchi 2008

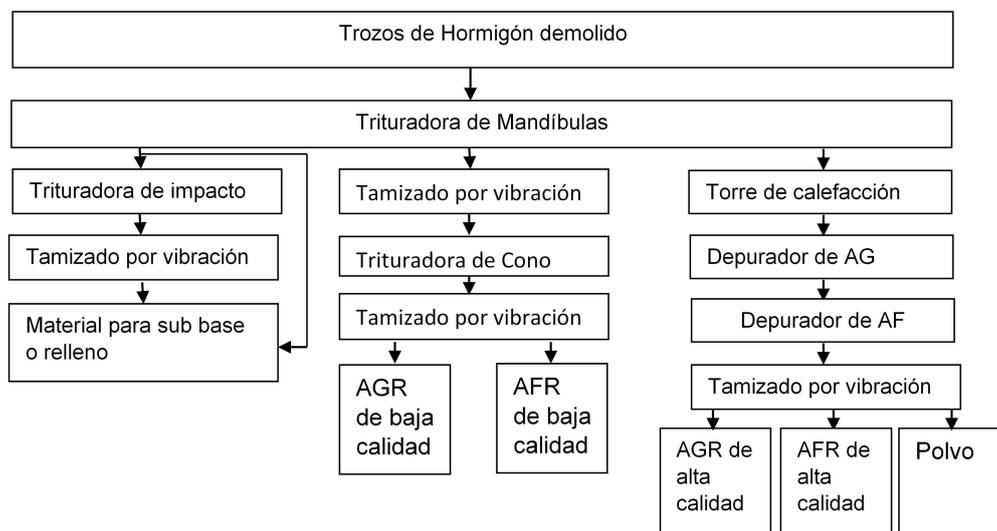


Figura 2.2. Calidad del AR en función del procesamiento. Adaptado de Noguchi 2008

Con el fin de obtener AR con el mínimo contenido de mortero adherido se han propuesto distintos tratamientos. A continuación, se discuten algunos de ellos.

Sui y Muller (2012) diseñaron un tratamiento para eliminar el mortero adherido al AR el cual consiste en someter al material a temperatura y posteriormente introducirlo en un molino de bolas. Para las fracciones entre 2-4 mm encontraron que el rendimiento del tratamiento se mantiene constante independientemente de la temperatura y la condición de humedad previa al tratamiento. Los autores, sin embargo, no indican la cantidad de mortero al inicio como así tampoco al finalizar el tratamiento.

Choi et al (2014) proponen recubrir el AGN utilizado en el hormigón de origen con óxido de hierro (el cual tiene una alta constante dieléctrica), para luego someter al hormigón a triturar a microondas con temperatura lo cual separa casi por completo el mortero del agregado. De este modo se logra un AGR con un mínimo contenido de mortero adherido. No obstante, la utilidad práctica de este método dependerá del mantenimiento de la efectividad del tratamiento durante la vida en servicio del hormigón.

Por otra parte, Moro et al (2012) evaluaron distintas características de hormigones en los que se empleó 50% de AGR recubierto con una lechada impermeabilizante de cemento, en comparación con idénticos hormigones con 50% de AGR sin ningún tipo de tratamiento. De los resultados obtenidos por los autores surge una pequeña mejora en la resistencia a compresión y diferencias significativas en la velocidad de succión capilar cuando el AGR fue impermeabilizado.

Resulta oportuno destacar que cualquier tratamiento tendiente a mejorar las características del AR encarece el costo de producción del mismo. Además, dependiendo del tipo de tratamiento que se realice, el impacto ambiental podría ser más nocivo que el que produce el AR al ser depositado en vertederos. Por ejemplo, el método propuesto por Moro et al (2012) implica un mayor consumo de cemento, el cual genera en su producción una gran cantidad de CO₂. Por lo tanto, resulta necesario evaluar si el tipo de tratamiento a aplicar al AR es económicamente factible y ambientalmente sustentable.

2.3 Composición del agregado reciclado

Por lo indicado en párrafos anteriores, la composición del agregado fino reciclado (AFR) difiere del agregado fino natural (AFN) en cuanto a que puede estar compuesto por roca natural y pasta de cemento en proporciones variables (Hansen 1986, Zega et al 2010)

como se esquematiza en la Figura 2.3. De esta manera, una partícula de AFR puede estar constituida en su totalidad por agregado natural (AN), mortero o por ambos en proporciones variables.



Figura 2.3. Composición del AFR

Respecto de los factores que influyen en las cantidades relativas de cada componente del AFR, no existe consenso hasta el momento. Distintos autores (Hansen y Narud 1983, Ulsen et al 2012, Pereira et al 2012) han sugerido que es función de las características de la roca natural y calidad del hormigón de origen, como así también del método de procesamiento utilizado para su obtención.

En el caso del AGR, se ha planteado que el tamaño de la fracción considerada guarda una relación inversa con el contenido de mortero (Hansen y Narud 1983, Katz 2003). En tanto que, en el AFR la composición mineralógica (evaluados mediante análisis térmico diferencial y difracción de rayos X) no se ve mayormente afectada por el tamaño de partícula (Evangelista et al 2015). No obstante, Florea y Brouwers (2012) observaron que la relación entre el contenido de mortero adherido y el tamaño de partícula puede depender de la cantidad de ciclos de trituración.

Por otra parte, según la procedencia y el procesamiento al cual fue sometido el AFR, el mismo puede contener impurezas tales como yeso, ladrillos, asfalto, etc. Al respecto, Dapena et al (2009), al estudiar el AFR proveniente de la trituración de desechos de hormigón, encontraron que el mismo estaba compuesto por 48,3% de agregado y mortero, 38,63% de agregado natural, 12,23% de mezcla bituminosa, 0,2% de ladrillo, 0,13% de yeso y un 0,08% de otros materiales. Lima y Leite (2012) informaron un contenido de 57% de mortero, 17% de hormigón y 27% de material cerámico.

A los fines de esta tesis, en adelante se tratará el AFR proveniente de residuos de hormigón, definiéndose a los mismos como aquellos agregados que surgen de la trituración

de hormigones de diversos orígenes y están compuestos mayoritariamente por agregado natural y pasta de cemento. En el tratamiento de esta tesis, se excluyen otros agregados finos reciclados que tengan proporciones importantes de residuos cerámicos, asfalto, materiales blandos, etc., los cuales serán tratados en adelante como agregados finos reciclados mixtos (AFRM).

2.3.1 Mortero adherido

El mortero adherido en el AR tiene una porosidad mayor que casi la totalidad de los agregados naturales utilizados habitualmente en la producción de hormigón. Adicionalmente, este mortero adherido genera una zona de interfaz con el AN al que se encuentra adherido. En consecuencia, es esperable que las características físicas, mecánicas y durables de estos agregados se vean modificadas respecto de los AFN.

En el caso particular de los AFR no resulta adecuado considerar mortero adherido al agregado natural, sino que corresponde considerar la pasta adherida al agregado. Ello se debe a que la arena constituyente del mortero es un AFN.

Al ser la pasta de cemento presente en el AFR la principal diferencia respecto del AFN, resulta lógica la necesidad de su cuantificación a fin de establecer relaciones entre la cantidad de la misma y distintas características del agregado tales como absorción, densidad, durabilidad, etc.

2.3.2 Métodos para la determinación del mortero y/o pasta adherido

La cantidad de mortero presente en el AFR resulta difícil de determinar dado que, una vez desintegrada la pasta de cemento y la arena que formaba parte de dicho mortero quedará junto con las partículas del AN tornando impracticable la determinación fehaciente del mismo. Por este motivo, en el caso del AFR se realiza la determinación del contenido de pasta y no del contenido de mortero.

Si bien no existe hasta la actualidad un método normalizado para la evaluación de esta característica, se consideran a continuación dos metodologías habitualmente empleadas para la determinación del contenido de pasta y/o mortero en el AR.

Ataque con ácido clorhídrico: Consiste en atacar una muestra del agregado en estudio con una solución de ácido clorhídrico, la cual disuelve la pasta de cemento dejando

como remanente al AN. Este método presenta como inconveniente que el agregado natural es parcialmente disuelto, en mayor o menor grado según sea su composición mineralógica. Esto conduce a la necesidad de considerar dicha degradación a fin de que los resultados obtenidos no resulten sobrevalorados. Sin embargo, si este método se complementa con un análisis termogravimétrico del residuo soluble e insoluble, su potencialidad para determinar el contenido de pasta resulta satisfactoria independientemente de la mineralogía del AN.

Choque térmico: Consiste en someter una muestra de agregado, previamente saturado, a elevada temperatura durante un determinado tiempo (entre 30 minutos y 1 hora), lo cual crea tensiones en el interior de las partículas del agregado debido a la rápida evaporación del agua. En tal sentido, diversas temperaturas han sido consideradas para esta metodología: Jiménez et al (2013) propone 500°C, mientras que otros autores consideran más adecuado temperaturas en torno a 300°C (Sui y Muller, 2012). Luego, el AR caliente es introducido en agua fría, provocando la separación del mortero del agregado natural. Finalmente se secan ambas partes y se obtiene el porcentaje de cada una de ellas mediante separación manual. Este método es el más generalizado en el AGR, sin embargo, tiene una aplicación limitada en el AFR dado que la cuantificación del mortero y del agregado resulta difícil debido al tamaño de las partículas.

2.3.3 Contenido de mortero y/o pasta adherido en el AFR

Tal como fuera comentado anteriormente, la cantidad de mortero adherido dependerá en gran medida del procesamiento utilizado en la obtención del AR. En tal sentido, Pereira et al (2012) encontraron que el tamaño obtenido luego del proceso de trituración no influye en la cantidad de mortero adherido en el agregado. Contrariamente, Florea y Brouwers (2012) indican un mayor contenido de pasta (y consecuentemente de mortero) en las fracciones menores a 0,3 mm respecto de las fracciones mayores a dicho tamaño y de hasta 4 mm cuando los AFR se obtuvieron mediante una única trituración. Sin embargo, al utilizar un prototipo de trituradora inteligente retrituyendo la fracción mayor a 2 mm sucesivamente (los autores no indican la cantidad de ciclos de trituración), observaron un aumento en el contenido de pasta conforme disminuye el tamaño de la fracción considerada. En la Figura 2.4 se presentan los resultados informados por los autores para a) un solo ciclo de trituración y b) ciclos sucesivos de trituración.

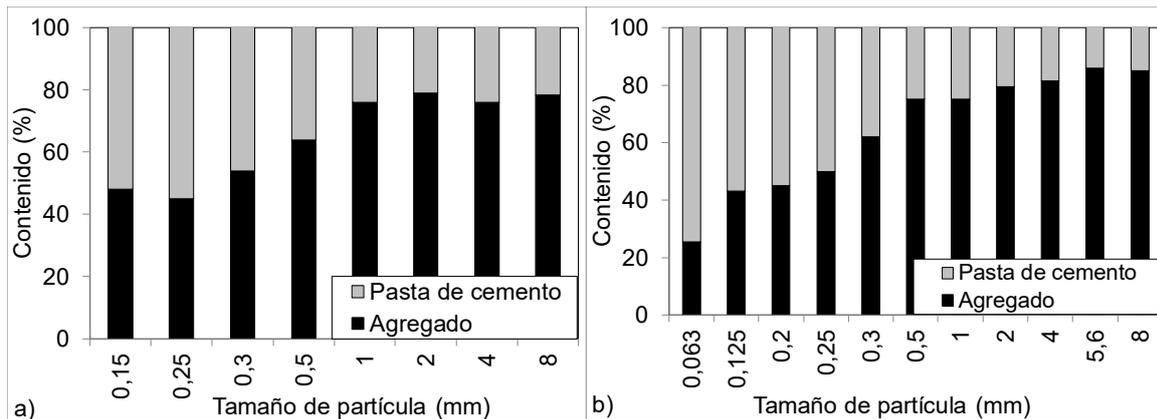


Figura 2.4. Contenido de pasta en función del tamaño de partícula para:
a) un ciclo de trituración; b) más de un ciclo de trituración
Adaptado de Florea y Brouwers (2012)

El tipo de AGN en el hormigón de origen podría influir en la composición del AFR obtenido a partir de él. Al respecto, Zega et al (2010) informaron contenidos de pasta de 28%, 36% y 39% para AFR provenientes de la trituración de hormigones elaborados con AGN de tipo cuarcítico, basáltico y granítico respectivamente, obtenidos con idénticos procesos de trituración. No se han encontrado otros estudios que evalúen la influencia de la mineralogía en el hormigón de origen sobre las propiedades del AFR.

Por otra parte, diversos autores (Hansen 1986, Katz 2003, Poon et al 2006) sugieren la presencia de partículas de cemento no hidratadas en el mortero adherido. Estas partículas, al entrar en contacto con agua, podrían hidratarse generando así cierta capacidad cementante por parte del AFR.

Al respecto, Poon et al (2006) indicaron la presencia de silicatos dicálcico y tricálcico (C_2S y C_3S respectivamente) en muestras de AFR sometidas a difracción de rayos X, cuyos tamaños de partículas eran de hasta 0,3 mm. Sin embargo, cabe mencionar que los picos indicados por los autores como C_3S y C_2S no se condicen con los picos correspondientes a dichas fases.

Por otra parte, Arm (2001) encontró que el módulo resiliente de capas de subbase elaboradas con AFR, sin la adición de ligante alguno, se incrementó con la edad. Estos resultados fueron luego confirmados en campo, donde a la edad de dos años el valor de dicho módulo duplicó el alcanzado en el periodo de un mes. Este comportamiento fue atribuido a la presencia de partículas de cemento no hidratado en el AFR.

Evangelista et al (2015), atribuyen la capacidad cementante del AFR a la presencia de partículas de ceniza volante sin hidratar presentes en el hormigón de origen. Los autores postularon que dichas partículas habrían reaccionado con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente en el AFR generando una reacción secundaria con aporte resistente.

Otros autores (Solyman 2005, Sosa et al 2015a) han evaluado la composición del AFR mediante difracción de rayos X sin poder detectar la presencia de cemento anhidro. No obstante, y puesto que las fases con contenidos menores al 2-3% son prácticamente indetectables por los equipos de rayos X, podría ocurrir que las proporciones de C_3S y C_2S estén presentes en proporciones menores a dicho valor. Al respecto, a modo de ejemplo en la Tabla 2.1 se presenta la dosificación de dos hormigones (H1 y H2) con contenidos de cemento bien diferenciados.

Tabla 2.1. Dosificación de dos hormigones convencionales de distintos niveles resistentes

Material (Kg/m^3)	H1	H2
Agua	151	149
Cemento	251	381
Arena Silícea	546	480
Arena de Trituración	322	332
Piedra 6.20	1102	1102

Tabla 2.2. Composición potencial y compuestos de fase de distintos tipos de cementos portland según las fórmulas de Bogue

Composición (%)	Cemento 1	Cemento 2	Cemento 3	Cemento 4	Cemento 5
SiO_2	21,1	21,1	21,1	20,1	21,1
Al_2O_3	6,2	5,2	4,2	7,2	7,2
Fe_3O_3	2,9	3,9	4,9	2,9	2,9
CaO	65	65	65	65	64
SO_3	2	2	2	2	2
Resto	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Productos de hidratación según fórmulas de Bogue (%)					
C_2S	20,69	16,71	12,72	17,16	28,83
C_3S	52,76	58,04	63,33	53,64	41,97
C_4AF	8,82	11,86	14,90	8,82	8,82
C_3A	15,20	7,18	2,84	14,17	14,17

Si se calculan en dichos hormigones la cantidad potencial de C_2S y C_3S antes de la hidratación contemplando distintos tipos de cementos (Tabla 2.2Tabla 2.2), se puede observar que las cantidades promedios relativas de C_2S son de 2,03 y 2,99 % con máximos de 3,05 y 4,49 %, mientras que los porcentajes de C_3S son de 5,7 y 8,4 % en promedio con máximos de 6,7 y 8,4 % para H1 y H2 respectivamente, como surge de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Porcentajes potenciales relativos de C_3S y C_2S de acuerdo a fórmulas de Bogue en los H1 y H2 (utilizando los cementos indicados en Tabla 2.2)

H1					
	Cemento 1	Cemento 2	Cemento 3	Cemento 4	Cemento 5
C_2S (%)	2,19	1,77	1,35	1,82	3,05
C_3S (%)	5,58	6,14	6,70	5,68	4,44
H2					
C_2S (%)	3,23	2,60	1,98	2,68	4,49
C_3S (%)	8,22	9,05	9,87	8,36	6,54

En base al análisis llevado a cabo resulta improbable entonces la detección de C_2S , puesto que aún previo a la hidratación del cemento las cantidades relativas presentes en el hormigón se encuentran apenas por encima de lo detectable en los equipos de rayos X. Por otra parte, si bien los porcentajes de C_3S calculados mediante las fórmulas de Bogue resultan mayores que los detectables mediante DRX, por ser esta fase de rápida reacción, es esperable que a la edad de trituración haya reaccionado casi en su totalidad y por tanto no se encuentre en el AFR en porcentajes mayores a los detectables mediante dicha técnica.

2.4 Forma y textura superficial

La forma y textura superficial del agregado fino tienen una gran influencia sobre la consistencia de morteros y hormigones. En comparación con las texturas superficiales lisas y formas esféricas, las texturas rugosas y formas angulosas, (características de los agregados de trituración), presentan una mayor cantidad de puntos de contacto, lo cual eleva el ángulo de fricción interna del material granular. Este hecho puede traducirse en una menor fluidez de morteros y hormigones elaborados con este tipo de agregados (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1998, Bascoy 1992).

Por otra parte, como ventaja de las texturas rugosas y formas angulosas, puede mencionarse que generan una interfaz pasta-agregado de mejor calidad debido a una mayor adherencia entre ambos materiales. Como consecuencia de ello, podrían aumentar las resistencias mecánicas, especialmente en hormigones de alto desempeño (de Larrard 2011).

Respecto de la evaluación de la forma y textura de los agregados, existen diversos métodos (software de análisis de imágenes, índices de esfericidad a través de análisis

visual, etc.) con distintos niveles de complejidad. Los más complejos carecen de utilidad práctica debido a que resultan laboriosos, a la vez que no se ha encontrado una correlación fehaciente entre los resultados que se obtienen a partir de ellos y las propiedades de las mezclas en estado fresco. En consecuencia, a modo comparativo, la observación visual y/o petrográfica (con lupa y/o microscopio) resulta suficiente para establecer diferencias entre distintos agregados en cuanto a su forma y textura superficial.

Debido al mortero presente en la composición del AFR, la textura superficial es altamente rugosa y de mayor porosidad que la que poseen la mayoría de los AFN, ya sean de río o de trituración (Hansen 1986, Hincapié Henao y Aguja López 2003, Solyman 2005, Zega et al 2010).

Respecto de la forma de las partículas de los AFR Valencia et al (2015) encontraron que los AFN utilizados en su estudio, tenían menor esfericidad respecto de los AFR, mientras que la porosidad total de estos últimos fue 20 veces mayor que la de los AFN, lo cual hace suponer una textura superficial mucho más rugosa en los AFR. En la Figura 2.5 se presentan imágenes SEM de un AFN y un AFR donde puede observarse con claridad las diferencias en la textura superficial entre ambos agregados.

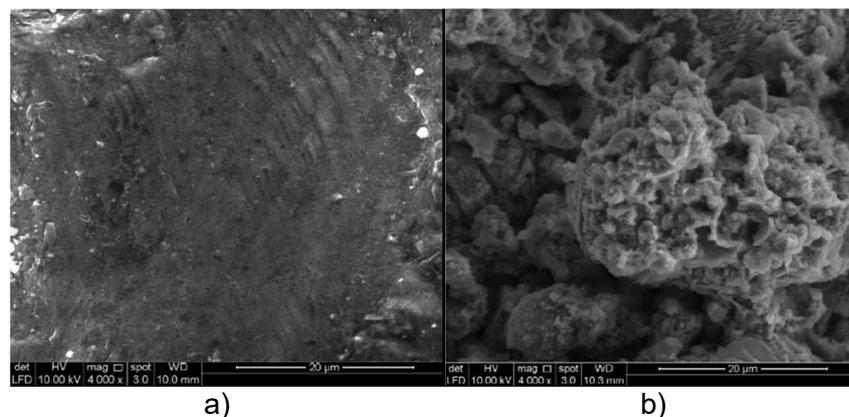


Figura 2.5. Imagen microscópica de la superficie de a) AFN y b) AFR. (Khoshkenari et al 2010).

La forma y textura de los AFR puede depender del tipo de procesamiento utilizado para su obtención. Al respecto, Fan et al (2015) informan que, al incrementar la cantidad de ciclos de trituración, las partículas del AFR presentan forma más redondeada y textura superficial menos rugosa que aquellos obtenidos a partir de un solo proceso de trituración.

La mayor angulosidad y textura superficial rugosa del AFR harían suponer que para una consistencia dada, debería emplearse una mayor cantidad de pasta que cuando se

utiliza un AFN. Sin embargo, el uso de aditivos reductores de agua, o una mayor cantidad de arena natural podrían mitigar dicho efecto (Katz 2003, Pereira et al 2012, Khoshkenari 2014).

2.5 Distribución de tamaños

La distribución del tamaño de partículas del agregado influye de manera directa en la consistencia y la terminación de los hormigones, y de manera indirecta en la compactación y la segregación de los mismos.

Hincapié Henao y Aguja López (2003) postulan que la distribución granulométrica de los AFR depende del procesamiento utilizado, particularmente del tipo y cantidad de trituradoras que intervienen en el proceso de obtención. En concordancia, Fan et al (2015) evidenciaron que cuando el AFR se obtuvo mediante ciclos sucesivos de trituración, los tamaños de partículas fueron menores que los obtenidos en el AFR del mismo origen en donde se utilizó sólo trituración primaria.

Contrariamente, otros autores (de Brito y Saikia 2013), al estudiar AFR provenientes de distintas plantas de reciclaje, con diferentes técnicas de procesamiento entre sí, observaron que las granulometrías de los AFR resultaron similares. En tal sentido, Castro (2011) encontró similares curvas granulométricas para el AFN y el AFR, aunque no informa la técnica de procesamiento utilizada para la obtención de los mismos. No obstante, este hecho indicaría la posibilidad de obtener distribuciones de tamaños similares a las que se obtienen con el AFN.

Por otra parte, Evangelista et al (2015) informan que tanto la cantidad de AFR obtenido como el Módulo de Finura (MF) del mismo presentan diferencias apreciables en función del tamaño de apertura de la trituradora de mandíbulas utilizada. Los resultados del mencionado trabajo se transcriben en la Tabla 2.4. Puede notarse un incremento del 154% en la cantidad de AFR producido con sólo el cambio en la apertura de mandíbulas de la trituradora. De manera concordante con los módulos de finura informados en Tabla 2.4, las curvas granulométricas de los agregados obtenidos con apertura mínima y media resultaron similares, mientras que con la máxima apertura la granulometría presenta ligeras diferencias.

Otro de los factores que podría influir sobre la distribución granulométrica es la resistencia del hormigón de origen. Sin embargo, las conclusiones de los trabajos en los

cuales se ha evaluado esta relación son coincidentes, indicando una influencia despreciable de la misma sobre la granulometría resultante (Hansen y Narud 1983, Ravindrarajah y Tam 1985, Sanchez de Juan 2005). Similares conclusiones se han obtenido al evaluar la influencia de la edad en la que se tritura el hormigón de origen sobre la granulometría (Katz 2003).

Tabla 2.4. Cantidad y MF del AFR en función de la apertura de la mandíbula de la trituradora. Adaptado de Evangelista et al 2015

Apertura de la mandíbula	Mínima	Media	Máxima
AFR (%)	43,7	25,8	17,2
MF	3,27	3,05	3,00

2.6 Densidad

La densidad del agregado se utiliza en el cálculo de las proporciones del hormigón y por tanto influirá en el peso unitario del mismo. En la dosificación de las mezclas, es generalizado el uso de la densidad aparente (definida como la relación entre el peso del agregado seco y el peso del agua que ocupa el mismo volumen de agregados con todos sus poros impermeables), la cual es función de la densidad del mineral que compone el agregado y de la cantidad de huecos del mismo (Neville 1975). Por lo tanto, debido a la composición del AFR, es esperable que se presenten diferencias apreciables en la densidad de éste respecto de los AFN.

En la Tabla 2.5 se presentan valores de densidad informados por distintos autores, donde puede observarse que la misma varía entre 1,63 y 2,46. Estas densidades son menores a las que poseen la mayoría de los AFN habitualmente utilizados en el hormigón, la cual se encuentra comprendida entre 2,60 y 2,70 (Mehta y Monteiro 1998).

Por otra parte, en un alto porcentaje de la bibliografía no se informa acerca de la resistencia del hormigón del cual provienen los AFR. No obstante, al analizar la relación resistencia a compresión del hormigón de origen-densidad de los AFRs producidos pareciera que las densidades más altas se corresponden con los niveles de resistencia mayores. No obstante, de la bibliografía utilizada en dicha tabla, ninguna tendencia clara puede establecerse.

Entre los factores que influyen en la densidad del AR pueden mencionarse la fracción de tamaños considerada, el tipo de agregado grueso del hormigón del cual proviene el AFR, el tipo de procesamiento utilizado y la composición del AFR.

Tabla 2.5. Densidad de los AFR

Referencia	Fracción considerada (mm)	f'c Hormigón de origen (MPa)	Densidad (sss)
Ravindrarah (1987)	0-5	60 ^a	2,32
Evangelista y de Brito (2004)	0,074-1,2	29,6 ^d	1,91
Corinaldesi y Moriconi (2009)	0-5	50-55	2,38
Vegas et al (2009)	0-5	29,8 ^c	1,63
		15,3 ^c	2,11
		23,6 ^c	2,14
		22,5 ^c	2,13
		16,2 ^c	1,98
17,3 ^c	2,20		
Evangelista y de Brito (2010)	0-1,19	29,6 ^a	2,16
Pereira et al (2012)	0-4	37,3 ^d	2,23
Kim y Yun (2014)	0-5	21 ^a	2,29
		21 ^a	2,15
Zega et al (2015)	0-4	35 ^a	2,35
Cartuxo et al (2015)	0-4	30 ^a	2,46
Hincapie Henao y Aguja López (2003)	0,075-5	No indica	2,43
Katz (2003)	0-4	7,4 ^b	2,23
		14,4 ^b	2,25
		28,3 ^b	2,23
Khatib (2005)	0-5	No indica	2,34
Poon et al (2006)	0-5	No indica	2,31
Zega y Di Maio (2006)	0-4	No indica	2,48
Kou y Poon (2009)	0-5	No indica	2,30
Castro (2011)	0,063-4	No indica	2,37
Tovar Rodríguez (2011)	0-4	No indica	2,31
Zega y Di Maio (2011)	0-4	No indica	2,56
Lima y Leite (2012)	0-5	No indica	2,55
Leite et al (2013)	0-5	No indica	2,45
Martínez et al (2013)	0-5	No indica	2,11
Mardani et al (2014)	0-4	No indica	2,44

^a Resistencia en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm

^b Resistencia en cubos de 12 x12 cm

^c Resistencia evaluada en testigos con gran dispersión

^d Resistencia en cubos de 15 x15 cm

En relación a la fracción de tamaño considerada, en el agregado grueso reciclado (AGR), distintos autores (Hansen y Narud 1883, Katz 2003) relacionaron el tamaño de las partículas con su densidad, indicando en general una disminución de la misma al disminuir las dimensiones de la partícula. Resultados similares fueron encontrados en el AFR (Hincapié Henao y Aguja López 2003, Sánchez de Juan 2005), lo cual fue atribuido a un mayor porcentaje de pasta adherida en las partículas de menor tamaño. Sin embargo, Pereira et al (2012) encontraron que un mayor porcentaje de partículas finas, producto de una mayor relación de reducción de la trituradora, no produce un aumento en el contenido de pasta del agregado. Tal hecho no permitiría atribuir la disminución de la densidad al mayor contenido de pasta adherido en las fracciones de menor tamaño.

El tipo de AGN del hormigón de origen es indicado por Zega et al (2010) como uno de los factores que influye en la densidad del AFR. Los autores evaluaron distintos AFRs provenientes de la trituración de hormigones con AGN granítico, cuarcítico y basáltico, en comparación con arenas de trituración naturales (AFT) de iguales tipos mineralógicos. Los autores concluyeron que la disminución de la densidad de los AFR respecto de los AFT de igual origen, fue mayor cuanto mayor era la densidad del AFT.

Como fuera mencionado en párrafos precedentes, otro de los factores que influye en la densidad de los AFRs es el tipo de procesamiento utilizado para su obtención. Al respecto, Fan et al (2015) utilizaron dos AFR, uno de los cuales fue sometido a trituración primaria y el otro a trituraciones sucesivas hasta generar solo AFR. En dicho estudio, los autores indican que el AFR obtenido por trituraciones sucesivas presentó mayor densidad que el obtenido mediante un único proceso de trituración. Tal comportamiento resulta lógico al considerar que, si se tritura el hormigón hasta generar sólo AFR, éste tendrá mayor proporción de AN en su composición y por tanto mayor será su densidad en comparación con un AFR obtenido mediante trituración primaria.

En cuanto a la composición del AFR, Zega et al (2010) observaron que la disminución en la densidad del AFR respecto del AFN es mayor cuanto mayor es el contenido de pasta. Por otra parte, la presencia de ladrillo y materiales cerámicos o bituminosos producirán una disminución de densidad mayor. Ello se debe a que son aún más porosos y menos densos que el mortero adherido en las partículas de agregado (Corinaldesi y Moriconi 2009, Dapena Garcia et al 2009).

2.7 Absorción

La absorción del agregado, así como su porosidad pueden influir en la adherencia con la pasta de cemento, en la resistencia al congelamiento y deshielo y en la resistencia a la abrasión (Neville 1975, Mindess y Young 1981).

La pasta de cemento, por su viscosidad, sólo puede penetrar en los poros más grandes del agregado. Sin embargo, sí lo puede hacer el agua. La cantidad de agua que podrá ingresar dependerá del volumen total, el tamaño y la continuidad de poros (Neville 1975).

Cuando el agregado es introducido en la mezcladora con un contenido de humedad menor al correspondiente para el estado saturado y superficie seca (sss), parte del agua de mezclado será absorbida por él, lo cual conducirá a una disminución de la relación a/c planteada inicialmente. Sin embargo, debido a la complejidad de llevar al agregado a tal condición, es una práctica habitual utilizar los agregados en estado secos y adicionar al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción del agregado.

A partir de lo mencionado anteriormente, la sensibilidad en la determinación de la absorción de agua del agregado resulta de fundamental importancia al momento de efectuar correcciones en la dosificación producto del contenido de humedad en que los mismos son empleados. Se mencionan a continuación una serie de métodos que se han propuesto como alternativa para evaluar la absorción de los AR.

2.7.1 Métodos experimentales para la evaluación de la absorción del AR

La metodología utilizada para la determinación de la absorción de agua constituye uno de los tópicos más controversiales al momento de evaluar el AR, debido a que, en general, al carecer de normativa específica se utilizan las correspondientes a los agregados naturales. Estas presentan procedimientos que pueden alterar la calidad del AR. Entre las críticas más usuales a los métodos normados, se encuentra que el secado a temperaturas del orden de los $100 \pm 5^\circ\text{C}$ puede remover parte del agua químicamente combinada en la estructura cristalina del mortero adherido, pudiéndose generar además microgrietas, que podrían aumentar la porosidad y absorción del AR. También se ha señalado que el secado con paño, en el caso del AGR, puede remover parte del mortero adherido a sus partículas.

Por otro lado, la absorción varía con el tiempo de inmersión de la muestra y por tanto no sería suficiente, en el caso del AGR, sumergir el material por 24 horas como establecen la mayoría de las normas para AN (Tam et al 2008). Respecto del AFR no se han encontrado estudios en los que se evalué el tiempo de inmersión. Estas dificultades han motivado que en los últimos años surjan algunos métodos alternativos pensados para salvar dichos inconvenientes, aunque la mayoría de ellos se restringen al AGR.

A continuación se describen y analizan algunos de los métodos propuestos para la evaluación de la absorción en los AFR.

La Norma IRAM 1520 establece el procedimiento para la determinación de la absorción de agua del AFN. El mismo consiste en secar el agregado a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, luego se sumerge en agua durante 24 horas. El procedimiento continúa esparciendo el agregado en una superficie plana y sometiéndolo a una corriente suave de aire, removiéndolo frecuentemente hasta llevarlo al estado sss. Dicho estado se determina colocando el agregado en un molde troncocónico de dimensiones establecidas y compactándolo con 25 golpes de varilla normalizada, luego se retira el molde y en función de la forma en la que se desmorona el agregado se establece la mencionada condición (sss), conforme esquema presentado en la Figura 2.6. Finalmente se toma una muestra de agregado de 500 g en condición sss y se lo seca en estufa hasta masa constante. La absorción del agregado será el cociente entre la diferencia de pesos en la condición saturada a superficie seca y la condición seca del agregado respecto del peso seco, expresado en porcentaje.

A este método no sólo se aplican las consideraciones antes mencionadas respecto de la temperatura de secado, sino que además cabe señalar que la determinación del estado saturado y superficie seca está fuertemente influenciada por el operador. Otro inconveniente que surge de esta metodología es que, al hacer circular corriente de aire por la superficie del agregado, si no se toman las precauciones del caso (las cuales no se encuentran establecidas en la normativa), puede disminuir la cantidad de partículas finas, que en el caso de AFR podrían ser las que mayor cantidad de mortero adherido presentan, y consecuentemente el valor de absorción estaría subvalorado.

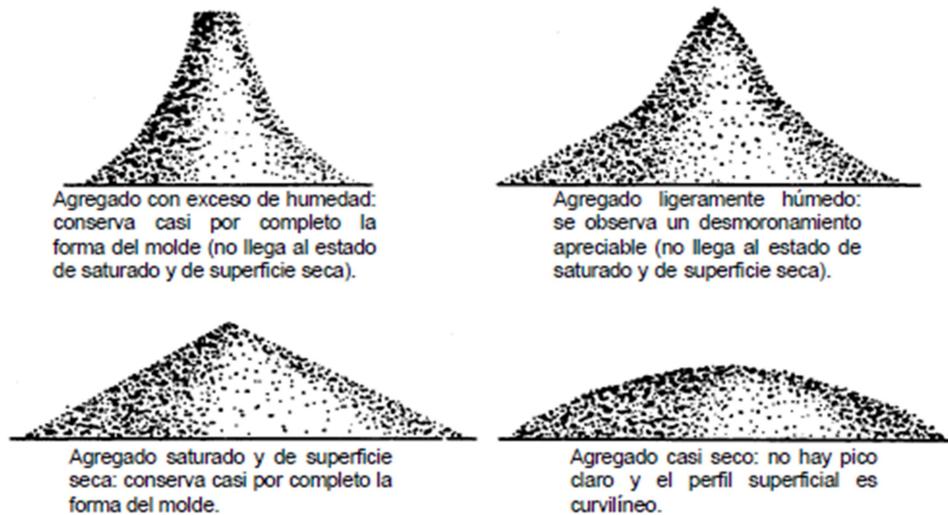


Figura 2.6. Estados de humedad del agregado fino. (IRAM 1520)

Otro inconveniente de este método resulta de su aplicación en agregados de trituración (Carrizo et al 2016). En tal sentido, en el caso de los agregados finos de trituración, su alta angulosidad y rugosidad superficial generan mayores puntos de contacto que si tuviera formas redondeadas. Ello genera la necesidad de un sobre secado para que este tipo de materiales adopte su ángulo de reposo. Se produce entonces un error por defecto en el contenido de humedad para el estado sss, y por lo tanto en la absorción y densidad saturada a superficie seca. En este sentido, la norma ASTM C 128 establece criterios complementarios al método del cono para determinar el estado sss para agregados de trituración o con gran contenido de polvo. Dichos criterios consisten en:

- Dejar caer un puñado de agregado fino usado en la prueba de cono sobre una superficie, desde una altura de 10 a 15 cm, y observar los finos que se dispersan en el aire. La presencia de finos suspendidos en el aire indica este problema, y entonces la condición sss será la correspondiente al punto en que sólo un lado del cono formado se desmorona ligeramente al retirar el molde.
- Llenar el cono rellenándolo luego de 10 golpes de compactación, haciendo otros 10 golpes, luego 3 y finalmente 2, volviendo a rellenar cada vez. Este procedimiento es diferente a un llenado con sobrante y 25 golpes normalmente usados.
- Para el caso que se note contenido de polvo excesivo, puede utilizarse un método de superficie, en el que se esparcen con la mano 100 g de material sobre una superficie plana, no absorbente, seca, limpia, oscura o brillante. Se retira el agregado luego de 1 a 3 s, si la mancha de humedad persiste por más de 2 s, entonces aún existe

humedad superficial en la muestra. Aun así, todos estos métodos coinciden en un criterio subjetivo de determinación de dicha condición.

- Remojar el agregado en agua con un colorante químico especial (por ej. una solución de cloruro de cobalto). En la eliminación del agua, el color del agregado presaturado con el colorante, cambia cuando se seca superficialmente, indicando el estado sss. El método también es afectado por distintos aspectos subjetivos como la interpretación del viraje colorimétrico en función de la coloración natural del agregado y el criterio del operador, y las variaciones del secado de acuerdo al tamaño de las partículas.

A pesar de que estos criterios presentan un avance respecto del método del cono, resulta oportuno destacar que son subjetivos y consecuentemente una gran influencia del operador es esperable.

Leite (2001) propuso un nuevo método para evaluar la absorción en el AFR, el cual consiste en colocar una muestra de agregado sobre un tamiz de 0,044 mm de abertura de malla con tapa, y sumergir el conjunto durante 24 horas, registrando la variación de masa, la cual se corresponde con la absorción del agregado. Las lecturas son efectuadas durante intervalos prefijados de tiempo, previa agitación suave a fin de remover el aire ocluido en la masa del agregado. Este método presenta la ventaja de poder representar la variación de la absorción en el tiempo. Sin embargo, como objeciones al método se debe considerar que la presencia de partículas de pequeño tamaño y partículas no hidratadas de cemento en la masa del AFR, pueden generar aglomeraciones que dificultan la absorción de agua y posibilitan la oclusión de aire, generando lecturas incoherentes (Rodríguez 2013a). Por otra parte, la primera lectura se toma en un intervalo de hasta dos minutos luego de sumergir la muestra (para posibilitar la estabilización de la balanza), lo cual conduce al desconocimiento de la absorción inicial del agregado. Puesto que diversos autores (Leite 2001, Evangelista y de Brito 2010, Rodríguez 2013b) han sugerido que el AR absorbe en los primeros diez minutos hasta el 80% de su absorción total, la imposibilidad de poder conocer el valor inicial del peso de la muestra sumergida constituye un gran inconveniente en este método.

Una variante interesante a este método es la propuesta por Rodríguez et al (2013a), que consiste en combinar el método de Leite (2001) antes descripto con el método del matraz establecido en la Norma EN 932. El método se lleva a cabo saturando en dos etapas. En la primera de ellas se sumerge el material en una solución de hexametasulfato de sodio determinándose el estado sss de manera análoga al de la Norma IRAM 1520. Luego se procede al secado a masa constante y se determina la absorción total. La

segunda etapa consiste en aplicar el método de Leite (2001) en el que en lugar de utilizar agua se utiliza una solución de hexametasulfato de sodio. Ello evita la aglomeración del agregado y permite la liberación del aire ocluido. La diferencia entre la absorción calculada según norma EN 932 (análogo a IRAM 1520) y la obtenida mediante la sumersión del conjunto (tamiz-muestra) es la absorción inicial del material sumergido. Cabe mencionar que más que un nuevo método para la determinación de la absorción se trata de dos métodos diferentes. El valor de la absorción se determina de manera análoga a IRAM 1520, utilizándose el método de Leite (2001) para conocer la variación de la absorción en el tiempo. Como ambos métodos operan por mecanismos diferentes y se ven influenciados por distintas variables, es objetable la practicidad y la congruencia de ambos métodos. Por otra parte, también aplican las consideraciones respecto del secado de la muestra y la obtención de la condición sss, discutidas al tratar el procedimiento según la normativa argentina.

El método de la conductividad eléctrica propuesto por Carrizo et al (2016) se basa en el principio de que la conductividad eléctrica de una muestra de agregado fino es función de su contenido de humedad superficial. Esta relación presenta cambios significativos cuando el agregado pierde su humedad superficial, es decir, cuando se encuentra en estado saturado a superficie seca, ya que la corriente no puede ser transportada por el contacto directo entre las partículas sólidas.

El método consiste en sumergir una muestra de material en agua durante 24h. Posteriormente la muestra se coloca en un recipiente que posee dos electrodos internos y dos externos y se realiza la compactación en dos capas. Luego se enrasa y se aplica un potencial eléctrico conectando la fuente de alimentación a los electrodos externos. A continuación, se mide la diferencia de potencial y la corriente eléctrica correspondientes, tomándose en cada medición aproximadamente 200 g de la muestra testada en un recipiente y registrándose el peso húmedo. Luego, el recipiente se coloca en estufa a una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ a fin de obtener el peso seco de la muestra. Este procedimiento se repite para diferentes estados de humedad mientras se realiza un secado progresivo de la muestra análogo al establecido en IRAM 1520. Graficando en escala semilogarítmica la conductividad obtenida en función de la humedad es posible obtener una curva que puede ser aproximada por dos rectas (Carrizo et al 2016, Kim et al 2017). La humedad correspondiente a la intersección de dichas rectas constituye el punto en que la conductividad decae abruptamente. La humedad en dicho punto corresponde al estado

saturado y superficie seca de la muestra. Este método presenta una buena reproducibilidad y una alta confiabilidad (Carrizo et al 2016, Kim et al 2017). Sin embargo, en tan sólo un estudio se lo utiliza para determinar la absorción de AFRs y se aplica únicamente en las fracciones más pequeñas. Adicionalmente es de notar, que resulta un método que difícilmente pueda aplicarse in situ, debido a la necesidad de un ordenador para realizar el gráfico que relaciona la conductividad con la humedad.

A partir de las diferencias señaladas entre los métodos descritos anteriormente, es esperable que el valor de absorción de los AFR varíe con el método utilizado para su determinación, por cuanto en los mismos intervienen diferentes variables y consideraciones respecto del tratamiento de la muestra.

En adición, debe señalarse que al no contar con un procedimiento único y normalizado para la determinación de la absorción en los AFRs, la determinación de dicha propiedad se constituye en una de las problemáticas de mayor complejidad a resolver. Como fuera mencionado, la capacidad de absorción determina la cantidad de agua a adicionar en las mezclas a fin de evitar cambios en la relación a/c efectiva.

2.7.2 Absorción del AFR

Al igual que lo que ocurre con la densidad, la pasta de cemento adherida en las partículas del AFR juega un rol principal para explicar las diferencias obtenidas al evaluar la absorción de estos agregados respecto del AFN. La mayor porosidad de la pasta es la responsable de la mayor absorción en estos agregados. En tal sentido, Zega et al (2010) determinaron que la absorción del AFR aumenta conforme se incrementa la cantidad de pasta en el mismo.

Por otra parte, en el caso del AGR, distintos autores concluyen que la absorción se incrementa conforme disminuye el tamaño de partícula considerada (Hansen y Narud 1983, Katz 2003, Sánchez de Juan 2005), posiblemente debido al mayor contenido de mortero que presentan las partículas de menor tamaño. Esta misma relación fue señalada por distintos autores (Hansen 1986, Angulo et al 2009) y corroborada por Zhao et al (2013) para dos calidades de AFR. Sin embargo, en experiencias previas llevadas a cabo en el LEMIT (Sosa et al 2018) no se encontró relación entre el tamaño de partícula y la absorción, como así tampoco entre el contenido de pasta y dicho parámetro, debido probablemente a la

imposibilidad de determinar con certeza la absorción de agregados provenientes de trituración (Carrizo et al 2016, ASTM C 128).

Otro factor que puede influir en la absorción, también en el caso del AGR, es la edad a la cual se tritura el hormigón. En tal sentido, Butler (2003) encontró que la absorción de agua se incrementó conforme lo hizo la edad a la que se trituró el hormigón. En el caso del AFR, los resultados obtenidos por Katz (2003) no muestran la misma tendencia que en el AGR. El autor reporta similares valores de absorción cuando la edad de trituración fue de 1, 3 y 28 días (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Absorción del agregado en función de la edad de trituración. (Katz 2003)

Edad de trituración (días)	Resistencia del hormigón de origen (MPa)	Absorción del agregado (%)
1	7,4	11,2
3	14,4	11,4
28	28,3	12,7

El tipo de procesamiento utilizado para la generación del AR influye en la composición del AFR, y por tanto podría influir también en la absorción. Al respecto, Ulsen et al (2013) estudiaron el efecto de la velocidad de operación de la trituradora de impacto de eje vertical, concluyendo que a mayor velocidad menor es la absorción del AFR obtenido.

Tabla 2.7 se resumen los valores de absorción del AFR informados por distintos autores, conjuntamente con la resistencia a compresión del hormigón de origen. Puede observarse que la absorción varía ampliamente, comprendiendo un rango de 4,0 a 19,3%, encontrándose el 85% de los valores informados por debajo del 11%. Cabe mencionar que los valores máximos encontrados corresponden a la determinación mediante el método propuesto por Leite (2001). En los restantes casos la absorción fue determinada por métodos análogos al establecido en la Norma IRAM 1520. No obstante, aun considerando el rango de absorción para el 85% de los casos informados (4,1 a 10,9%), la variación supera ampliamente a la de los AFN, los cuales se encuentran entre 0,2 y 3,44% (Neville 1975). Otro hecho relevante que surge de la

Tabla 2.7 es que no existe una tendencia clara respecto de la influencia de la calidad del hormigón de origen en la absorción del AFR resultante.

Tabla 2.7. Absorción del AFR

Referencia	Fracción considerada (mm)	Resistencia del Hormigón de origen (MPa)	Absorción del AFR (%)
Ravindrarajah (1987)	0-5	60	6,2
Evangelista y de	0,074-1,2	29,6 ^c	13,1 ^a
Corinaldesi y	0-5	50-55	7,1
Vegas et. al. (2009)	0-5	29,8 ^b	7,6
		15,3 ^b	8,09
		23,6 ^b	6,73
		22,5 ^b	7,84
		16,2 ^b	6,65
	17,3 ^b	7,18	
Evangelista y de	0-1,2	29,6	13,1 ^a
Pereira et al (2012)	0-4	37,3	10,9 ^a
Kim y Yun (2014)	0-5	21	5,83
		21	7,95
Zega et al (2015)	0-4	35	8,5
Cartuxo et al (2015)	0-4	30	7,09
Hincapie Henao y Aguja López (2003)	0,075-5	No indica	6,84
Khatib (2005)	0-5	No indica	6,25
Poon et al (2006)	0-5	No indica	10,3
Zega y Di Maio	0-5	No indica	4,1
Kou y Poon (2009)	0-5	No indica	11,86
Castro (2011)	0,063-4	No indica	9,1
Zega y Di Maio	0-4	No indica	8,5
Lima y Leite (2012)	0-5	No indica	19,3 ^a

Leite et al (2013)	0-5	No indica	5,5*
Martínez et al (2013)	0-5	No indica	6,27
Mardani et al (2014)	0-4	No indica	6,81

^a Determinados según el método propuesto por Leite (2001)

^b Resistencia a compresión evaluada en testigos con gran dispersión.

^c Resistencia en cubos de 15x15 cm

El amplio rango de absorción del AFR encontrado en la bibliografía referida podría responder a distintos factores entre los que pueden mencionarse: la metodología utilizada, la calidad de la pasta de cemento presente en el AFR, como así también a los diferentes orígenes del agregado natural del hormigón del cual proviene el AFR. Al respecto, cabe mencionar que en la República Argentina la absorción de los agregados naturales varía entre 0,8 y 2,5% (Cabrera et al 2012), mientras que en otros países la variación puede ser significativamente más alta.

2.8 Durabilidad del AFR

La durabilidad del agregado adquiere fundamental importancia cuando el hormigón es utilizado en estructuras expuestas en ambientes agresivos, como puede ser la exposición a ciclos de congelamiento y deshielo. La respuesta del agregado frente a esta sollicitación está relacionada con su porosidad, y es posible por lo tanto que los AFR presenten un comportamiento menos satisfactorio en comparación con los AFN.

Son escasos los trabajos que evalúan la durabilidad de los AR. En el único que pudo encontrarse (Zega et al 2010) se evaluó la durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525) de AFR provenientes de hormigones con AGN de origen cuarcítico, granítico y basáltico, en comparación con AFTs de iguales orígenes. Incrementos del 202, 690 y 187 % respecto a la pérdida obtenida en los AFTs fueron observadas para el AFR de origen cuarcítico, granítico y basáltico respectivamente. Las diferencias encontradas fueron atribuidas a la presencia de mortero adherido, el cual genera una zona de interfaz con el AN. El sulfato precipita en estas zonas causando la separación del mortero y del AN con la consiguiente reducción de tamaños. Esta metodología de ensayo no necesariamente representa las sollicitaciones de este material durante su vida en servicio. Cabe mencionar que distintos autores (Hansen 1986, Limbachiya et al 2000, Zega et al 2006) han reportado un similar desempeño frente a reiterados ciclos de congelación y deshielo en hormigones convencionales y reciclados. Esta similitud se obtuvo aún para los hormigones en los que se utilizaron AGR con una gran pérdida frente al ensayo mencionado.

2.9 Contenido de polvo

El polvo adherido a las partículas de agregado tiene un efecto nocivo respecto de la adherencia agregado-pasta. En hormigones de altas prestaciones, esta adherencia tiene un rol fundamental. Otro efecto nocivo de las partículas finas es su elevada superficie específica. Esto produce una mayor demanda de agua de mezclado para una consistencia dada.

Como fue mencionado anteriormente, uno de los factores que determina el contenido de polvo en el AFR es la técnica de procesamiento utilizada para su obtención, particularmente en lo que se refiere al tipo de trituradora empleada. Las trituradoras de impacto tienen un mayor poder de reducción respecto de las de cono y mandíbulas, por lo cual su empleo genera un mayor contenido de finos (Sánchez de Juan 2005). De igual modo, Pereira et al (2012) encontraron que la reducción del tamaño de salida en la trituradora incrementa significativamente la cantidad de finos (partículas menores a 75 μm).

En cuanto a las cantidades relativas de polvo en el AFR en comparación con el AFT, Zega et al (2010) encontraron que el contenido de material menor a 75 μm en AFR de distintos orígenes fue igual o menor que el determinado en AFTs. Sin embargo, cabe mencionar que los AFT no fueron generados por los autores, sino que corresponden a muestras comerciales.

2.10 Recomendaciones y normativa

El empleo de AR en la elaboración de hormigones se encuentra contemplado en la normativa de algunos países. En la Tabla 2.8 se presenta un resumen de la normativa vigente en cada uno de ellos.

Puede notarse en la Tabla 2.8 que un gran número de países que poseen normativa para el uso de AR en la elaboración de hormigón contempla sólo el empleo de la fracción gruesa, o bien impone algún tipo de restricción al empleo del AFR. Este hecho podría deberse a que las investigaciones sobre las propiedades de hormigones con AGR cuenta con décadas de estudio que avalan su utilización sin mayores perjuicios en las propiedades del hormigón. En el caso de la fracción fina (AFR) tales estudios comienzan a realizarse en los últimos años y no han alcanzado hasta la actualidad consenso respecto de su impacto sobre el desempeño de los hormigones en los que se emplea.

Tabla 2.8. Normativa internacional existente para el empleo de AFR en hormigón. Adaptado de Evangelista y de Brito 2014

País	Tipo de AR	Máximo porcentaje de utilización	Resistencia máxima del Hormigón con AFR (MPa)	Limitaciones al empleo
Argentina	AGR	20	---	--
Alemania	---	0	--	Sólo AGR
Bélgica	AFR	100	37	Con similares características que el AFN
Brasil	AFRM / AFR	100	15/15	No estructural
España	---	0	--	Solo AGR
Estados Unidos	AFR	100	No limita	Cualquier tipo de Hormigón
Holanda	AFRM / AFR	100	50/25	Solo si es usado con AGN
Hong Kong	---	0	--	Sólo AGR
Japón	AFRM / AFR	100	18/18	Fundaciones
Portugal	---	0	--	Sólo AGR
Reino Unido	---	0	--	Sólo AGR
Rusia	AFRM / AFR	50/100	15/20	Hormigón no pretensado
Suiza	AFRM / AFR	20/100	37/0	No pretensado
China	---	0	--	Sólo AGR
Dinamarca	AFRM / AFR	20	20/40	Ambientes no agresivos

2.11 Empleo del AFR en morteros y hormigones

2.11.1 Métodos de dosificación

A nivel mundial existen diversos métodos de dosificación, con distintos niveles de aceptación y complejidad. Estos métodos tienen como finalidad determinar las proporciones de los materiales componentes que permitan cumplir con las especificaciones de consistencia y resistencia requeridas, a partir del conocimiento de distintas propiedades de dichos materiales componentes.

El método de dosificación tal vez más utilizado mundialmente es el propuesto por el American Concrete Institute (ACI 211 2009). En éste, las características del agregado tales como su forma, textura y distribución de tamaños tienen una influencia indirecta en el proporcionamiento de la mezcla. Otros métodos como por ejemplo el descrito por de

Larrard (1999), que da mayor relevancia a estas características y permite, por lo tanto, ajustar las cantidades relativas de agua y cemento a utilizar (optimizando así las mezclas), no han contado con la validación suficiente para su universalización.

Cuando los métodos de dosificación desarrollados para hormigones con agregados naturales son aplicados para dosificar hormigones reciclados pueden aparecer algunas discrepancias respecto del comportamiento esperado. Una de las críticas más usuales que se suele plantear al utilizar AR, consiste en que para obtener un mismo grado de resistencia que en hormigones convencionales se debe utilizar un mayor contenido de cemento. Atendiendo a esta crítica, Fathifazl et al (2009) propusieron una metodología específica para el diseño de mezclas con AGR, llamada Método de Volumen de mortero Equivalente (EMV). Este método consiste en tomar en cuenta el contenido de mortero adherido al AGR como parte del contenido total de mortero del hormigón a elaborar, siendo este último igual al que se tendría en un hormigón convencional de idénticas proporciones. Con dicha metodología es posible disminuir la cantidad de cemento con respecto a las mezclas con AGR diseñadas con métodos convencionales.

Al respecto, González Arias (2012) encontró que no existieron diferencias en la resistencia a compresión entre hormigones con AFR y AFN de dos relaciones a/c (0,45 y 0,60) dosificados mediante el método Bolomey y el EMV. Sin embargo, el contenido de cemento para los hormigones dosificados por este último método fue un 7 y 8% menor para las relaciones a/c 0,45 y 0,60 respectivamente.

Similares resultados fueron obtenidos por Jiménez et al (2013) quienes al utilizar 20% de AGR en hormigones dosificados por los métodos Bolomey y EMV informan resistencias que fueron significativamente superiores en estos últimos. El contenido unitario de cemento fue un 10% menor para los hormigones dosificados mediante EMV.

Si bien el concepto del EMV podría resultar válido también para la dosificación de hormigones con AFR, no se han encontrado en la literatura estudios que utilicen dicho método.

2.11.2 Consistencia

Si bien existen definiciones diversas del término consistencia, puede decirse que la misma es una medida relativa de la facilidad con que una mezcla de hormigón fresco puede

fluir, y está íntimamente relacionado con las características reológicas de la mezcla (Bascoy 1992).

La consistencia del hormigón se puede ver afectada por distintos factores, entre los que se pueden mencionar: características y propiedades del cemento y de las partículas del agregado, contenidos de agua y de cemento, relación agua-cemento, cantidades relativas de pasta y agregado, utilización de aditivos y temperatura del hormigón entre otras.

De los factores indicados, se analizarán a continuación los referidos a las características del agregado, a fin de analizar la influencia que el AFR puede tener sobre la consistencia de morteros y hormigones.

El principal factor que puede modificar la consistencia de la mezcla en estado fresco es la absorción del agregado. Como se discutiera anteriormente (ver apartado 2.7), si el agregado posee una alta absorción y es introducido en la mezcla con una humedad menor a la correspondiente a su condición sss, podría absorber parte del agua de mezclado, disminuyendo la relación a/c inicial. El agua absorbida por el agregado resulta entonces en una pérdida de trabajabilidad de la mezcla en el tiempo. Sin embargo, es posible que, al utilizar el agregado seco, éste se cubra rápidamente con una capa de pasta de cemento lo cual impide que la totalidad del agua necesaria para su saturación ingrese en él (Neville 1975). Este hecho genera incertidumbre respecto a la cantidad de agua que es absorbida y en consecuencia a la relación a/c efectiva de la mezcla.

En tal sentido, diferentes alternativas han sido adoptadas a fin de evitar la modificación en el estado fresco de las mezclas como consecuencia de la absorción del AFR. En algunos casos se ha utilizado al agregado en condición seca, añadiendo al agua de mezclado la cantidad de agua correspondiente a distintos grados de humedad del agregado (Ravindrarajah y Tam 1987, Leite et al 2013). Otros autores (Mardani et al 2014, Kim y Yun 2014) en cambio, han optado por utilizar el AFR en la condición sss. Otra variante consiste en el empleo del AFR en condición seco al aire y el uso de aditivos reductores de agua a fin de lograr similares consistencias que en los hormigones patrones (Zega y Di Maio 2006, Sosa et al 2015b), aunque en este caso no se evitaría la modificación de la relación a/c efectiva de la mezcla, si se cumple lo enunciado por Neville.

Valencia et al (2015), al estudiar el comportamiento reológico de morteros elaborados con AFR y diferentes contenidos de agua y dosis de aditivo superplastificante,

observaron que el torque registrado para los morteros reciclados fue significativamente mayor que en los morteros patrones. Este comportamiento fue atribuido a la retención de agua por parte del AFR como consecuencia de su mayor porosidad, quedando menor cantidad disponible para la movilidad del conjunto. Cartuxo et al (2015) elaboraron hormigones con distintos porcentajes de sustitución de AFN por AFR de igual granulometría, incrementando la cantidad de agua de mezclado para obtener un mismo nivel de consistencia que en los patrones. Los autores informan que al utilizar 100% de AFR la cantidad de agua necesaria para un mismo grado de consistencia se incrementó un 17%.

Contrariamente, Khatib (2005) observó que el asentamiento aumentó conforme lo hizo el porcentaje de AR (fino y grueso) utilizado. El autor no informa acerca del estado de humedad que poseían los AFR utilizados. Al respecto, Leite et al (2013) sugieren que los hormigones en los que se utiliza AFR pueden presentar un mayor asentamiento que los ejecutados con AFN. Esto se debe a la mayor cantidad de agua de mezclado inicial producto de la compensación de la absorción del AFR.

Por otra parte, distintos autores (Leite 2001, Pereira et al 2012, Rodríguez et al 2013 b) concluyen que la absorción del AR en los primeros 30 minutos de sumersión es de hasta un 90% de la absorción total. Neville (1975) sugiere que, en los AN, luego de 10 minutos de mezclado la absorción resulta despreciable debido a la formación de una película de pasta que los recubre. Suponiendo este hecho válido también para los AR, parecería más adecuado un grado de compensación menor o igual al 90% de la absorción de los mismos.

La forma y textura superficial de los agregados ejercen gran influencia en la consistencia de morteros y hormigones, puesto que de la fricción interna que posea el esqueleto granular depende el volumen de pasta necesaria para obtener una consistencia dada. Agregados con texturas rugosas y alta angulosidad generarán un mayor número de puntos de contacto entre partículas, elevando la fricción del conjunto respecto de las texturas lisas y formas esféricas y/o cúbicas (Cabrera et al 2010, de Larrard 2011).

El AFR, al ser obtenido mediante procesos de trituración, presenta en general forma angulosa. Además, como consecuencia del mortero presente en su composición, su textura superficial presenta gran rugosidad. Debido a estas características, es esperable que existan diferencias significativas en la consistencia de morteros y hormigones respecto a los elaborados con AFN, especialmente cuando los AFR sean utilizados en reemplazo de arena natural de río, la cual posee forma redondeada y textura superficial lisa.

El uso de aditivos reductores de agua podría compensar el efecto que la mayor angulosidad, textura superficial y absorción del AFR tienen sobre la consistencia. Al respecto, en experiencias previas (Sosa et al 2015b) al evaluar la consistencia en hormigones con 20 y 40% de AFR comparativamente con hormigones con AFT en idénticos porcentajes, se observó que era necesario una mayor dosis de superplastificante en los primeros. Sin embargo, Zega y Di Maio (2006) encontraron que a pesar de utilizar mayores dosis de aditivo plastificante no fue posible obtener el mismo nivel de asentamiento para hormigones con 50 y 75% de reemplazo de arena natural de río por AFR. Estos resultados podrían denotar una influencia mayor de la forma y textura por sobre la absorción del AFR.

En tal sentido, Leite et al (2013) realizaron estudios a fin de evaluar la consistencia (a través del asentamiento) de hormigones con distintos niveles de reemplazo del AFN por AFR, concluyendo que los menores asentamientos en los hormigones con AFR pueden producirse por la mayor rugosidad y angulosidad de los mismos.

En concordancia con ello, en estudios realizados por Mardani et al (2014) sobre hormigones en los cuales utilizó AFR en reemplazo de AFT en distintos porcentajes, se observaron que la consistencia se incrementó levemente con el aumento en el porcentaje de sustitución, a pesar de utilizar el agregado en estado sss. Los autores atribuyen tal comportamiento a la mayor rugosidad del AFR utilizado en comparación con el AFN.

Aumentos en la consistencia conforme se incrementa el porcentaje de AFR fueron informados también por Solyman (2005), quien al estudiar hormigones con distintos contenidos de cemento y porcentajes de reemplazo del AFN por AFR, encontró que la consistencia resultó similar en las mezclas ricas, mientras que la misma disminuyó en las mezclas pobres cuando el AFR fue utilizado en un 30%. Tal comportamiento fue justificado por el autor a partir de la posible existencia de un efecto filler de la fracción más pequeña del AFR. El autor manifiesta que dicho efecto se debe a que al utilizar el AFR en pequeños porcentajes podría compensar la mayor rugosidad y forma más angulosa, mientras que, al utilizarlo en porcentajes mayores, la forma y textura podrían cobrar una importancia mayor. No obstante, cabe mencionar que las mezclas ricas tienen un mayor volumen de pasta, y al ser ésta quien lubrica las partículas de agregado, los resultados podrían deberse a una menor influencia de la forma y textura de las partículas, más que a un efecto filler en las mezclas ricas.

Por otra parte, Pereira et al (2012) al estudiar hormigones con distintos porcentajes de AFR y la utilización de aditivos superplastificantes, encontraron que su efecto decreció conforme aumentó el porcentaje de AFR utilizado. Una posible explicación a estos resultados podría encontrarse en que parte del aditivo incorporado con el agua de mezclado haya sido absorbido por el AFR, quedando menor cantidad disponible para fluidificar la mezcla.

Al respecto, en estudios previos llevados a cabo en el LEMIT (Sosa et al 2014) se evaluó la consistencia (a través del asentamiento) de morteros en los que se emplearon 20 y 40% de AFR pre-humedecido (se utilizó el 50% del agua correspondiente a la absorción a 24hs), en comparación con morteros con 20 y 40% de AFT. El asentamiento se determinó inmediatamente después de finalizado el mezclado y a los 20 minutos de ponerse en contacto el agua con el cemento. De los resultados obtenidos se pudo concluir que la fluidez de los morteros con AFR resultó menor que la de los morteros de referencia, a pesar que no hubo absorción del agua de mezclado por parte de los agregados. El menor asentamiento obtenido al emplear el AFR fue atribuido a la mayor rugosidad superficial y forma más angulosa de los AFR en comparación con el AFT utilizado. La misma justificación fue utilizada por Leite et al (2013), quienes observaron un menor asentamiento en hormigones elaborados con distintos porcentajes de AFR, respecto de los hormigones patrones. Complementariamente, los autores indican que el menor peso específico del AFR resulta en una reducción del asentamiento, concluyendo además, que el ensayo de la mesa de flujo resulta más adecuado para evaluar la fluidez de las mezclas. Dichas conclusiones fueron justificadas por los autores con a partir de considerar que la compactación dinámica vence la fricción interna del esqueleto granular y por lo tanto es posible obtener valores de extendido similares o aún mayores que al utilizar partículas de forma redondeada. Estos resultados podrían indicar que la forma y textura del agregado poseen una mayor influencia que su absorción.

Como resumen de la bibliografía consultada surge que el grado de humedad en que se utilice el AFR y/o la forma en que se compensa la absorción del mismo, tendrá una gran influencia en la reología de los morteros y hormigones.

La consistencia del hormigón se incrementa al utilizar AFR y en mayor medida cuanto mayor es el porcentaje de sustitución del AFN. No resulta claro, hasta el momento, si este comportamiento se debe a la mayor absorción del AFR y/o a las diferencias en forma y textura que presenta el mismo respecto de los AFN. A pesar de ello, parece posible la

obtención de similares niveles de asentamiento mediante la utilización de aditivos reductores de agua (tomando las debidas precauciones respecto al modo en que el mismo es incorporado a la mezcla para evitar la absorción por parte del AFR), o mediante la adición al agua de mezclado de la cantidad de agua correspondiente a parte de la absorción del AFR.

2.11.3 Aire incorporado

No se ha encontrado en la bibliografía consultada estudios que vinculen el empleo de AFR y el aire incorporado al hormigón, como tampoco la influencia de ellos sobre la eficiencia de aditivos incorporadores de aire. Adicionalmente, pocos trabajos informan el contenido de aire en los hormigones con AFR. Entre los disponibles (Zega y Di Maio 2011, Leite et al 2013, Kim y Yun 2014, Zega et al 2015) parece surgir que la presencia de AFR no modifica significativamente el contenido de aire que incorpora el hormigón. Tan sólo Leite et al (2013) observaron modificaciones sustanciales de tal propiedad en comparación con hormigones de referencia. No obstante, el contenido de agua inicial, y por lo tanto el volumen de pasta se incrementó en los hormigones con AFR. Puesto que el aire se encuentra retenido en la pasta de cemento es posible que parte de las diferencias se deban al incremento en el volumen de pasta de los hormigones en que se emplearon AFRs.

2.11.4 Peso por unidad de volumen

Debido a la menor densidad del AFR, el peso por unidad de volumen (PUV) del hormigón se ve disminuido cuando se reemplaza parte del AFN por AFR. Este hecho fue confirmado por diversos autores (Ravindrarajah y Tam 1987, Zega y Di Maio 2006, Pereira et al 2012, Sosa et al 2012a, Cartuxo et al 2015, Sosa et al 2015b).

Si bien resulta lógico pensar que la disminución en el PUV sea función de la cantidad de AFR utilizado, en ninguno de los casos citados las diferencias entre los hormigones de referencia y los elaborados con AFR supero el 5%.

2.11.5 Comportamiento mecánico

2.11.5.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón es considerada como una de sus propiedades más importantes, dado que ofrece un panorama general de la calidad del

mismo. Esto se debe a su fuerte relación con la estructura de la pasta de cemento endurecida (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1998).

Dada la naturaleza del AFR, el cual presenta una textura superficial rugosa, mayor angulosidad y absorción, y menor durabilidad y resistencia en comparación con los AFN, es esperable que las resistencias mecánicas se vean modificadas respecto a las obtenidas en morteros y hormigones elaborados con AFN.

Al respecto, Corinaldesi y Moriconi (2009) encontraron que la resistencia a compresión de morteros con 100% de AFR fue considerablemente menor que la obtenida en morteros de referencia con AFNs. Los autores atribuyeron tales resultados a la menor calidad del AFR respecto del AFN. No obstante, la menor resistencia a compresión podría deberse a la mayor relación a/c utilizada en los morteros con AFR respecto de aquellos con agregado natural ($a/c= 0,71$ y $0,60$ respectivamente), con el fin de obtener el mismo nivel de consistencia.

En experiencias previas llevadas a cabo en el LEMIT (Sosa et al 2012) se obtuvieron niveles resistentes similares e incluso algo superiores en morteros con 20 y 40% de AFR, en reemplazo de AFT, para tres relaciones a/c evaluadas (0,40; 0,50 y 0,60). Dicho comportamiento fue atribuido a la mayor absorción y textura superficial rugosa del AFR, en comparación con las del AFT utilizadas, y al contenido constante de agua de mezclado para todos los morteros. Esto produciría una relación a/c efectiva menor que la correspondiente a los morteros de referencia. Similares resultados fueron obtenidos por Fan et al (2015).

Por otra parte, Lima y Leite (2012) evaluaron morteros elaborados con 50% de AFR en reemplazo del AFN y diferentes contenidos de cemento, informaron que en mezclas ricas el uso del AFR produjo una disminución de la resistencia del orden del 8%, mientras que en las mezclas pobres la misma se incrementó un 15% respecto a morteros de referencia elaborados con AFN.

Zega y Di Maio (2006) encontraron que la resistencia a compresión de hormigones con 25, 50 y 75% de AFR fue del mismo orden e incluso algo superior a la obtenida en el hormigón patrón. El comportamiento indicado fue atribuido a la presencia de partículas de cemento sin hidratar en el AFR, lo cual generaría una hidratación complementaria con aporte resistente. Sin embargo, también podría deberse a una relación a/c efectiva menor al utilizar los AFR en estado seco y no compensar la absorción de los mismos.

Los mismos autores (Zega y Di Maio 2011) en estudios posteriores informan niveles similares de resistencia a compresión a 28 y 84 días al utilizar 20% de AFR, mientras que al emplear un 30% encontraron una disminución del 5% respecto de hormigones análogos elaborados con AFN. Similares disminuciones en la resistencia fueron reportadas por Evangelista y de Brito (2010) al elaborar hormigones con 30 y 100% de AFR (con tamaño máximo de 1,19 mm) en reemplazo del AFN de igual granulometría. En estudios previos (Evangelista y de Brito 2004) los autores informan niveles resistentes similares e incluso ligeramente superiores en hormigones con 10, 20, 30, 50 y 100% de AFR en reemplazo del AFN. En ellos se incrementó la cantidad de agua de mezclado en 3,0; 6,1; 9,2; 12,0 y 16,0%, respectivamente. Tal comportamiento fue atribuido a la presencia de partículas no hidratadas de cemento.

Mardani et al (2014) también evidenciaron disminuciones en la resistencia de alrededor del 7% al utilizar 60% de AFR en condición sss en reemplazo del AFN. Para porcentajes de sustitución menores, la resistencia a compresión fue del mismo orden que la del hormigón de referencia. La similitud en los niveles resistentes en hormigones con reemplazo del AFN por AFR en porcentajes que varían de 10 a 100% fueron reportados también por otros autores (Pereira et al 2012).

En adición a lo anteriormente tratado, disminuciones en la resistencia menores a un 15% respecto del hormigón de referencia aún para 100% de utilización del AFR fue observada por distintos autores (Solyman 2005, Kim y Yun 2014). Contrariamente, Khoshkenari et al (2014) al utilizar 100% de reemplazo del agregado natural (fino y grueso) por AR, encontraron que la resistencia a compresión disminuyó 38, 34 y 27% a edades de 3, 7 y 28 días. En los hormigones bajo estudio se adicionó la cantidad de agua necesaria para lograr el mismo asentamiento que en los hormigones patrones. En el mismo estudio cuando la misma consistencia fue obtenida mediante la utilización de aditivos reductores de agua sin compensar la absorción del AFR, la resistencia a compresión resultó un 10% mayor que en los hormigones patrones.

Por otra parte, una relación inversa entre el contenido de AFR y la resistencia a compresión fue informada por Cartuxo et al (2015). Sin embargo, otros autores (Khatib 2005, Sosa et al 2014) encontraron que no hay una tendencia clara respecto a la influencia del contenido de AFR en la resistencia a compresión, tanto en morteros como en hormigones, pero que sí existe una reducción de la misma en comparación con hormigones elaborados con AFN.

En tal sentido, en la Figura 2.7 se presentan los resultados informados por distintos autores, de la resistencia a compresión de hormigones en función del porcentaje de AFR utilizado. Se puede observar que no es posible establecer una tendencia definida respecto de la influencia del contenido de AFR sobre dicha propiedad. No obstante, se evidencia con claridad que para contenidos de AFR menores o iguales al 30%, la resistencia resulta similar a la de los hormigones convencionales en casi la totalidad de los casos.

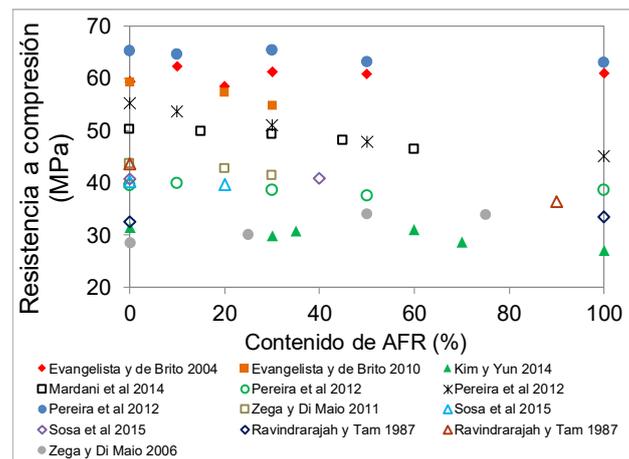


Figura 2.7. Resistencia a compresión en función del contenido de AFR

Como fuera tratado anteriormente (ver 2.11.1), la forma en que se compensa la absorción del AFR puede variar la relación a/c planteada inicialmente y esto a su vez tendría influencia en la resistencia a compresión. Al respecto, Leite et al (2013) al compensar la absorción del AR (fino y grueso) mediante la adición al agua de mezclado de distintas tasas de humedad (60, 70, 80 y 90%) concluyen que no existe una tendencia definida sobre la influencia de este parámetro. Los resultados de resistencia a compresión informados por los autores para las distintas tasas de compensación de absorción y porcentajes de AR utilizados, conjuntamente con la resistencia del hormigón con 100% de AN (0AFR-0AGR), se presentan en la Figura 2.8. Surge de la misma que la resistencia a compresión se ve influenciada por el porcentaje en que el AR fue utilizado. Otros datos relevantes que se pueden observar son que para el 50% de AFR la resistencia a compresión es similar a la del hormigón patrón, mientras que al utilizar el 100% sólo se obtuvieron niveles resistentes similares para la tasa de compensación del 60%. Al utilizar AFR y AGR conjuntamente se observa una disminución significativa de la resistencia a compresión.

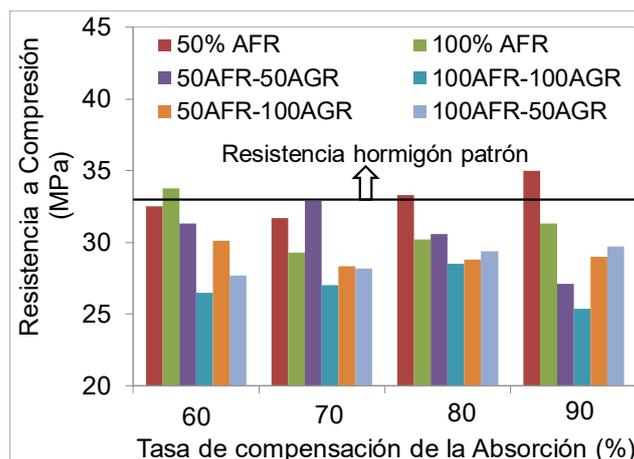


Figura 2.8. Resistencia a compresión en función de la compensación por absorción del agregado (adaptado de Leite et al 2013)

Debido a que en el mencionado estudio (Leite et al 2013) se utilizan distintas tasas de compensación de los AR resulta interesante realizar el análisis de la relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c. En la Figura 2.9 se presenta dicha relación para los hormigones estudiados en función de la relación a/c total y la efectiva. Cabe mencionar que el cálculo de la misma se ha efectuado con la hipótesis planteada respecto a que los agregados absorben durante el mezclado el 80% de su capacidad de absorción. Asimismo, el valor de absorción informado por los autores fue obtenido mediante el método propuesto por Leite (2001) tanto en los AR finos como en los gruesos.

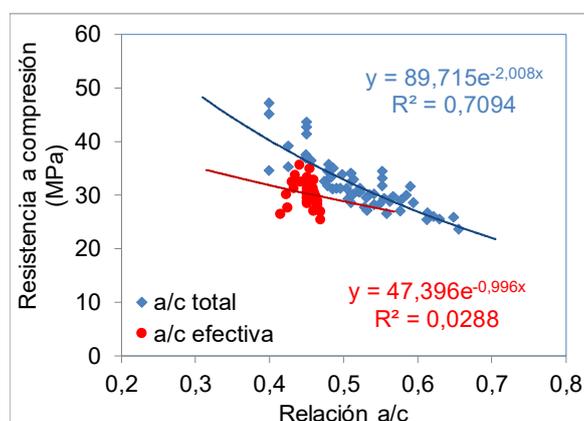


Figura 2.9. Relación entre la resistencia a compresión y la relación a/c de hormigones elaborados con AFRs. Adaptado de Leite (2013)

Si bien el ajuste obtenido no resulta bueno, puede observarse una clara tendencia exponencial, donde la resistencia disminuye conforme aumenta la relación a/c total. Cuando dicha relación se analiza en función de la razón a/c efectiva ninguna tendencia clara puede diferenciarse. Al respecto, la metodología empleada para determinar la absorción del AFR

podría conducir a una sobrestimación de su capacidad de absorción y consecuentemente a un cálculo erróneo de la razón a/c efectiva. Debe considerarse, además, que la falta de una tendencia que relacione la resistencia a compresión con la relación a/c efectiva puede entenderse a partir de considerar que no es posible aseverar con certeza que el agregado absorba agua durante el mezclado. El efecto acumulado de ambos hechos, imposibilita el cálculo certero de la relación a/c efectiva. Ante tal situación resulta necesario rever la metodología empleada para compensar la absorción de los agregados.

A modo de resumen, en la Tabla 2.9 se presentan las resistencias a compresión informadas por distintos autores, indicándose las relaciones a/c total y efectiva (a/c ef) (en algunos casos ésta última fue indicada por los autores y en otros se calculó en base a la absorción del AFR informada). Puede observarse que con excepción de los resultados reportados por Kim y Yun (2014), en el resto de los casos en que la disminución de la resistencia ($\Delta f'c$) supera el 10%, la relación a/c total utilizada es apreciablemente mayor en los hormigones con AFR. Al respecto, como fuera discutido en el caso de la consistencia (ver apartado 2.11.2), la forma en que se compensa la absorción del AFR en la dosificación, puede generar un aporte extra de agua. Es decir, parte del agua incorporada a fin de compensar la absorción podría permanecer como agua libre generando una mayor porosidad de la pasta y consecuentemente provocar las disminuciones en la resistencia observadas.

Tabla 2.9. Resistencia a compresión, relación a/c efectiva y diferencias respecto al patrón para distintos porcentajes de utilización del AFR

Referencia	AFR (%)	a/c	a/c ef	f'c (MPa)	$\Delta f'c$ (%)
Evangelista y de Brito 2004	0	0,41	0,40	59,4	---
	10	0,42	0,42	62,2	+4,7
	20	0,44	0,43	58,4	-1,7
	30	0,45	0,44	61,2	+3,1
	50	0,46	0,45	60,7	+2,3
	100	0,48	0,45	61,0	+2,7
Evangelista y de Brito 2010	0	0,41	0,41	59,3	---
	20	0,48	0,44	57,3	-3,4
	30	0,45	0,45	54,8	-7,6
Kim y Yun 2014	0			31,5	---
	30			29,9	-5,1
	35	0,44	0,44	30,8	-2,2
	60			31,0	-1,6
	75			28,7	-8,9
	100			27,0	-14,2
Mardani et al 2014	0			50,2	---
	15			49,9	-0,6
	30	0,45	0,45	49,3	-1,8
	45			48,1	-4,2
	60			46,4	-7,6
Pereira et al 2012	0	0,55		39,5	---
	10	0,55		40,0	+1,3
	30	0,56	0,55	38,6	-2,3
	50	0,56		37,6	-4,8
	100	0,57		38,6	-2,3
	0	0,45		55,3	
	10	0,45		53,7	-2,9
	30	0,46	0,45	51,0	-7,8
	50	0,47		47,8	-13,6
	100	0,49		45,1	-18,4
	0	0,38	0,38	65,2	
	10	0,39	0,39	64,6	-0,9
	30	0,40	0,39	65,4	+0,3
	50	0,41	0,40	63,2	-3,1
	100	0,43	0,41	63,0	-3,4
Zega y Di Maio 2006	0	0,51	0,51	28,5	---
	25	0,51	0,49	30,1	5,5
	50	0,51	0,46	34,1	19,6
	75	0,51	0,45	34,0	19,3
Zega y Di Maio 2011	0	0,45	0,45	43,6	---
	20	0,45	0,43	42,7	-2,1
	30	0,45	0,41	41,4	-5,0

Tabla 2.10. Resistencia a compresión, relación a/c efectiva y diferencias respecto al patrón para distintos porcentajes de utilización del AFR

Referencia	AFR (%)	a/c	a/c ef	f'c (MPa)	$\Delta f'c$ (%)
Sosa et al 2015b	0	0,40	0,39	40,2	---
	20	0,40	0,36	39,7	-1,2
	0	0,40	0,39	40,7	---
	40	0,40	0,35	40,9	0,5
	0	0,50	0,49	29,3	---
	20	0,50	0,45	32,4	10,6
	0	0,50	0,49	32,3	---
	40	0,50	0,43	31,0	-4,0
	0	0,60	0,59	23,1	---
	20	0,60	0,54	23,4	1,3
	0	0,60	0,59	23,0	---
	40	0,60	0,52	26,6	15,7
Ravindrarajah y Tam 1987	0	0,55	0,55	32,6	---
	100	0,68	0,45	33,5	2,8
	0	0,55	0,55	43,6	---
	90	0,67	0,45	36,4	-16,5

Por otra parte, de la Tabla 2.9 surge que en los casos en los que las relaciones a/c total y efectiva coinciden (utilización del agregado en la condición saturado y superficie seca), las diferencias en la resistencia a compresión resultan dentro de la dispersión propia de dicha propiedad mecánica.

A partir de lo indicado en la bibliografía consultada, podría considerarse que parte de las diferencias reportadas por distintos autores respecto de la influencia del uso del AFR, se deba no sólo a la inferior calidad de estos agregados respecto del AFN, sino también a la forma en la que se compensa la absorción del AFR.

2.11.5.2 Otras resistencias mecánicas

Las resistencias a flexión y a tracción directa e indirecta del hormigón guardan relación con su resistencia a compresión, pudiendo estimarlas como un porcentaje de esta última.

Khoshkenari et al (2014) encontraron que la resistencia a tracción por compresión diametral en hormigones se redujo hasta en un 40% al utilizar 100% de AR. Similares resultados fueron informados por Corinaldesi y Moriconi (2009) en estudios realizados sobre

morteros, en los cuales se produjo una significativa reducción en la resistencia a tracción respecto de los morteros patrones.

Reducciones menos significativas fueron informadas por Mardarini et al (2014), quienes indicaron disminuciones de 0,8; 2,8; 3,8 y 7,9% al utilizar 15, 30, 45 y 60% respectivamente de AFR en condición sss. Análogos resultados pueden encontrarse en Kim y Yun (2014), quienes observaron resistencias levemente inferiores (hasta 5%) en los hormigones elaborados con AFR respecto de los de referencia.

Contrariamente, Ravindrarajah y Tam (1987) encontraron resistencias ligeramente superiores al utilizar 100% de AFR, respecto de los hormigones patrones. Incrementos mayores fueron indicados por Leite (2001), quien informó que para hormigones de alta relación a/c, a mayor contenido de AFR la resistencia a tracción se incrementó. Tal relación se invirtió en hormigones de baja relación a/c. Dicho comportamiento fue atribuido a una compactación más deficiente en los hormigones con bajas relaciones a/c. Sin embargo, otra explicación posible al comportamiento señalado es que el mismo podría deberse a una mayor adherencia pasta-agregado producto de la mayor angulosidad del AFR, lo cual en mezclas pobres tendría una influencia mayor.

Respecto de la resistencia a flexión, Ravindrarajah y Tam (1987) hallaron que la misma fue ligeramente mayor para hormigones con 100% de AFR respecto de los hormigones patrones. Similares resultados fueron observados por Leite (2001), quien indica un incremento del orden del 15% para hormigones con 100% de AFR, respecto de los hormigones elaborados con AFN.

Corinaldesi y Moriconi (2009), al evaluar la resistencia a flexión de hormigones con 100% de AFR en reemplazo del AFN, encontraron que no hubo diferencias significativas con respecto de los elaborados con AFN.

Cabe mencionar que la zona de interfaz pasta-agregado y/o mortero-agregado tiene un mayor efecto en la resistencia a flexión que en la resistencia a compresión (Neville 1975). En general, debido a la mayor rugosidad superficial y forma angulosa del AFR respecto del AFN, la calidad de las interfaces podría verse mejorada con el uso del agregado reciclado, tal como se evidencia en la Figura 2.10. Sin embargo, de acuerdo a la forma en que se compensa la absorción del AR en la dosificación, la calidad de la interfaz pasta-agregado y la porosidad de la pasta, puede ser menor, igual o mayor que la de los

hormigones convencionales. Esto podría explicar los resultados contradictorios respecto de la influencia del AFR en las resistencias a tracción.

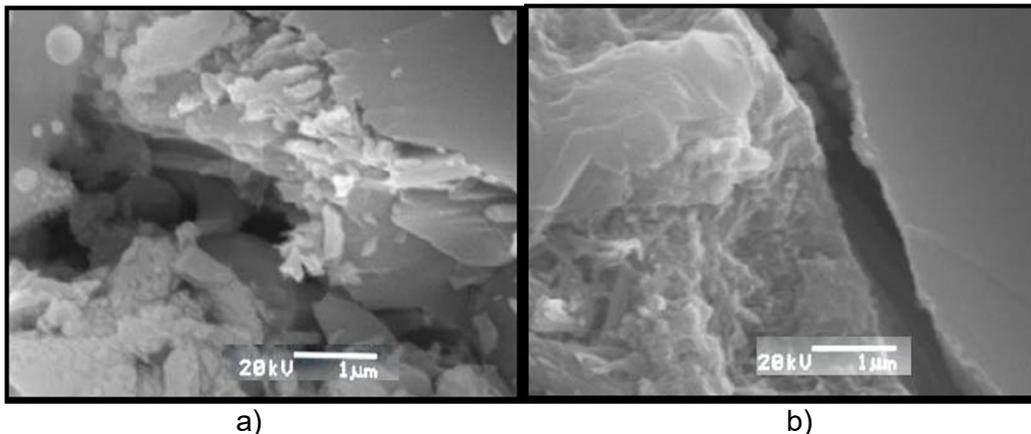


Figura 2.10. Interfaz pasta-agregado para a) AFR y b) AFN. (Leite 2001)

Un tema que ha sido poco estudiado a nivel internacional es el referido a la adherencia entre barras de acero y hormigones con AFR. Tal es así que sólo un trabajo pudo ser encontrado en la literatura disponible (Kim y Yun 2014). En el mismo se concluye que hasta reemplazos del 60% del AFN por AFR la tensión de adherencia no se ve afectada por el uso de AFR.

2.11.6 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático del hormigón es función de los módulos de sus fases componentes (pasta de cemento y agregado) y de las características de las interfaces pasta-agregado y mortero-agregado. En la Figura 2.11 se observa la no linealidad de la relación esfuerzo-deformación. Este hecho se explica a través de la existencia de la zona de interfaz (Mehta y Monteiro 1998), cuya calidad generará una influencia considerable sobre el módulo de elasticidad de las mezclas cementíceas.

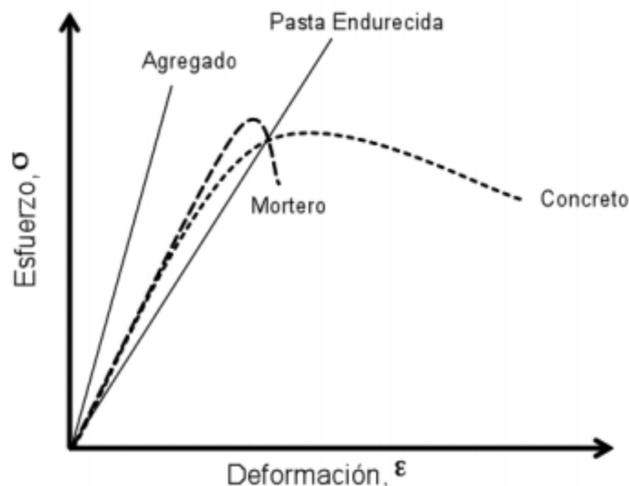


Figura 2.11. Módulo de elasticidad del agregado, pasta, mortero y hormigón. Serrano-Guzman y Perez-Ruiz (2010)

Con respecto a la incidencia del AFR sobre el módulo de elasticidad del hormigón, Ravindrarajah y Tam (1987) encontraron una reducción del mismo del 20% al utilizar 100% de AFR. Similares resultados fueron informados por Cartuxo et al (2015), quienes reportan disminuciones del 15% respecto del hormigón de referencia cuando se compensó la absorción del AFR. Sin embargo, cuando no se compensó la absorción de los AFRs se obtuvieron incrementos del orden del 15% respecto del hormigón patrón elaborado con AFN y sin la utilización de aditivo reductor de agua.

Contrariamente, un mismo nivel en el módulo de elasticidad de hormigones con AFR y hormigones convencionales ha sido informado por distintos autores. Zega y Di Maio (2006) encontraron que hormigones elaborados con 25, 50 y 75% de AFR presentaron similar módulo de elasticidad que el obtenido en el hormigón patrón elaborado con AFN. Los mismos autores, en estudios posteriores (Zega y Di Maio 2011), informaron niveles similares del módulo de elasticidad en hormigones con 20% de AFR. Al incrementar el contenido a 30% el módulo se disminuyó un 7%. Similares resultados fueron informados por Evangelista y de Brito (2010), quienes al utilizar un 30% de AFR observaron una reducción del módulo de elasticidad de un 5%, mientras que al utilizar 100% de AFR la reducción fue del 20% en comparación con hormigones elaborados con AFN de igual granulometría que el AFR.

En concordancia con lo indicado en el párrafo precedente, Pereira et al (2012) concluyeron que el comportamiento σ - ϵ no se ve afectado por el uso de AFR, para un mismo nivel de resistencia. En contraposición a lo indicado en párrafos anteriores, Kim y

Yun (2014) observaron incrementos en el módulo de elasticidad de hormigones con 30 y 60% de reemplazo del AFN por AFR. Cuando la sustitución fue total, se produjo una reducción de un 2% respecto del hormigón de referencia.

Las diferencias encontradas respecto de la influencia del AFR en el módulo de elasticidad del hormigón podrían atribuirse al resultado de dos efectos contrarios. Por un lado, el menor módulo del AFR generaría una disminución de tal propiedad en el hormigón. Por otra parte, debido a su forma y textura superficial, una mejor calidad de la interfaz pasta-agregado, y consecuentemente una mejora del módulo de elasticidad podría producirse. En consecuencia, la influencia relativa del AFR sobre tal propiedad dependería del compromiso entre ambos efectos contrapuestos.

2.11.7 Módulo de elasticidad dinámico

Pocos trabajos evalúan el módulo de elasticidad dinámico del hormigón con AFR, sin embargo, en los que tratan esta temática se observa que hay una disminución del mismo al utilizar este tipo de agregado, la cual se incrementa cuanto mayor es el contenido del mismo (Khatib 2005).

Mardani et al (2014) encontraron una disminución del orden del 10% en el módulo dinámico cuando se utilizó 60% AFR, mientras que Ravindrarajah y Tam (1987) informaron reducciones del orden del 25% en hormigones en los cuales se reemplazó el 100% del AFN por AFR.

Dado que el módulo de elasticidad dinámico es sensible a los cambios en la porosidad total del hormigón, las disminuciones observadas por los distintos autores podrían atribuirse a la mayor porosidad del AFR respecto del AFN.

2.11.8 Durabilidad

El ACI 201 define a la durabilidad del hormigón como "*su capacidad para resistir a la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro*", es decir, la capacidad del material para mantener sus propiedades en el tiempo. La durabilidad del hormigón dependerá de la calidad y proporciones de los materiales empleados, como así también de las condiciones del medio en el que está expuesto.

La durabilidad del hormigón guarda una relación directa con la estructura de poros. Estos constituyen la vía de ingreso de los agentes agresivos que pueden deteriorar al hormigón (Mehta y Monteiro 1998). La distribución, tamaño y conectividad de los poros en el hormigón dependerán principalmente de la relación a/c, el grado de hidratación y la calidad de la zona de interfaz. Otros factores como las características del agregado influyen de manera indirecta, por cuanto determinan la cantidad de agua necesaria para una consistencia dada.

En el caso de los hormigones con AFR, son escasos los estudios que evalúan su durabilidad. Los pocos estudios disponibles evalúan algún aspecto de la durabilidad mediante ensayos aislados tales como la absorción, el ingreso de cloruros, la carbonatación, etc. Por lo expuesto, el tratamiento de esta temática se abordará en conjunto, a pesar de ser distintos los mecanismos de deterioro que intervienen en el hormigón en cada uno de los ensayos propuestos para la evaluación de las distintas propiedades durables.

Al elaborar hormigones con 30 y 100% de la fracción menor a 1,19 mm de AFR, Evangelista y de Brito (2010) encontraron que parámetros tales como la absorción por capilaridad, la penetración de cloruros y la profundidad de carbonatación se incrementaron sustancialmente en comparación con hormigones convencionales. La abrasión, otra propiedad relacionada con el comportamiento durable en hormigones que estarán expuestos a desgaste superficial, se vio disminuida al utilizar AFR. Las disminuciones informadas fueron de 6 y 30% en hormigones con 30 y 100% de reemplazo del AFN por AFR. Sin embargo, los autores concluyen que es factible la utilización de hasta un 30% de la fracción indicada de dicho agregado en hormigones que no tengan requerimientos durables.

A pesar de una menor relación a/c efectiva, al no compensar la absorción del AFR, Zega y Di Maio (2011) encontraron que la absorción de agua de hormigones elaborados con 20 y 30% de AFR se incrementó un 13% respecto de hormigones con AFN. Idéntico incremento encontraron en la capacidad de succión capilar. Respecto de la penetración de agua a presión, informaron similares valores para el hormigón convencional y aquellos elaborados con 20 y 30% de AFR. A pesar del incremento observado en la succión capilar y la absorción de agua, los hormigones con AFR cumplieron con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201-2005 para hormigones con requerimientos durables.

Similar análisis puede encontrarse en Mardani et al (2014), donde al estudiar las propiedades de transporte de hormigones con distintos porcentajes de AFR (con sustituciones de hasta del 45%) los resultados obtenidos se ubicaron dentro de los límites prescriptivos establecidos en el Código Modelo CEB-FIB (1990). En dicho estudio, la absorción, la penetración de agua a presión y el ingreso de cloruros se incrementaron conforme lo hizo el porcentaje de AFR utilizado.

Por otra parte, Evangelista y de Brito (2004) observaron una relación lineal entre el aumento de la absorción de agua y el porcentaje en que el AFR fue utilizado. En el caso de la succión capilar, para reemplazos del AFN por AFR de hasta 30%, encontraron que las diferencias fueron despreciables. Al utilizar 50 y 100% de AFR la absorción por capilaridad se incrementó hasta un 150% respecto de los hormigones de referencia.

Respecto de la durabilidad frente a ciclos de congelamiento y deshielo, Kim y Yun (2014) concluyeron que no se produjo deterioro significativo luego de 300 ciclos en hormigones con diferentes porcentajes de AFR.

Zaharieva et al (2003) evaluaron la permeabilidad al agua, mediante una cámara triaxial, de hormigones elaborados con 100% de AR, encontrando que los mismos presentaron dos veces la permeabilidad de los hormigones patrones. Además, informaron que, si bien la permeabilidad al aire se incrementa al utilizar AR, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango indicado para hormigón convencional no expuesto a ambientes agresivos fuertes.

2.12 Contracción por secado

La contracción por secado es el cambio de volumen del hormigón causado por el movimiento de humedad dentro del material y su consiguiente pérdida, cuando existe un gradiente de humedad entre el medio ambiente y el hormigón (Idiart Castellano 2008).

Debido a que la contracción producida por la hidratación del cemento (contracción autógena) y la debida a la carbonatación (contracción por carbonatación) se producen por mecanismos específicos prácticamente independientes de los que generan la contracción por secado, y dado que esta última es la más relevante en cuanto a orden de magnitud (según Bazant y Wittmann 1982, entre un 97 y 99% de la contracción total), a los fines de esta tesis se tratará la contracción debida a la pérdida de humedad del hormigón.

Cuando el hormigón se expone a una humedad ambiente por debajo de la saturación y el agua presente en los grandes capilares o poros del hormigón se evapora (la cual causa poca o nula contracción), se induce un gradiente interno dentro de la pasta de cemento. Este gradiente impulsa el movimiento de las moléculas de agua desde la superficie o entre capas del C-S-H hacia los capilares vacíos. El agua en la superficie o intercapa del C-S-H, la cual está ligada por fuertes tensiones capilares (Acker 1997), genera cambios de volumen al migrar hacia los capilares, los cuales constituyen la contracción por secado.

Los cambios de volumen que se producen en el hormigón debido al movimiento de agua en su interior se explican según diversos autores (Basant 1972a, Setzer 1980, Mindess y Young 1981, Beltzung y Witmman 2005, Maramuya 2010) por diferentes mecanismos, en función de la humedad relativa a la que está expuesto el material, de acuerdo al esquema de la Figura 2.12. Los mecanismos que dominan cada región de dicha figura son: 1 y 2- Pérdida del agua en los poros capilares, 3- Pérdida del agua adsorbida en la superficie del C-S-H, y 4- pérdida de agua entre las capas del C-S-H.

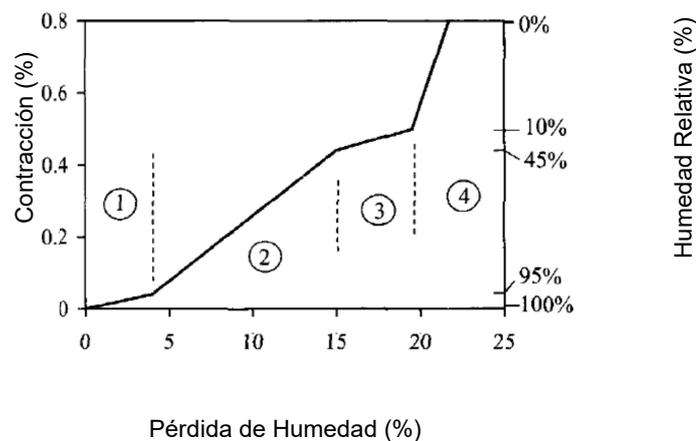


Figura 2.12. Mecanismos de la contracción en función de la humedad relativa. Adaptado de Mindess y Young (1981)

A continuación, se abordarán los mecanismos propuestos por los cuales se explican los cambios de volúmenes en los dominios 1 a 4:

1 y 2- Tensión capilar: El agua que se encuentra en los pequeños capilares está parcialmente influenciada por la tensión superficial que ejercen las paredes del poro, y por lo tanto no puede ser removida por evaporación, a menos que la humedad relativa esté por debajo de cierta cantidad que dependerá del radio del poro. El agua sólo puede perderse

por la formación de una interfaz aire-agua (menisco), lo cual requiere energía. Como resultado de la interacción del agua con las paredes del poro, el menisco adopta una superficie curva y el agua está bajo presión hidrostática. Debido a ello, ejercerá la correspondiente presión hidrostática en el esqueleto sólido y podría ocurrir por lo tanto un reordenamiento de las partículas disminuyendo el tamaño de poros y generando cambios de volumen. Los grandes poros capilares que se vacían a humedades relativas (HR) por debajo del 95%, tienen una gran relación volumen-superficie y ejercen poca o nula tensión. Sin embargo, a baja HR la tensión crecerá rápidamente, y puesto que la tensión capilar no puede existir a HR por debajo del 45% debido a que los meniscos no son estables, la remoción de la tensión hidrostática a esta HR debería estar acompañada de un relajamiento de los sólidos y un incremento de longitud.

3- Tensión de desunión (Disjoining Pressure): El agua es adsorbida en la superficie del C-S-H a cualquier HR. El espesor de esta película de agua se incrementa con el incremento de la HR. Un conjunto de partículas coloidales de C-H-S ejercen sobre las partículas adyacentes fuerzas de Van der Waals, poniendo sus superficies en contacto cercano. La adsorción del agua en la superficie del C-S-H crea una tensión de desunión (resulta de la orientación de las moléculas en el film de agua adsorbido), la que se incrementa conforme lo hace el espesor de agua adsorbida entre partículas. Este fenómeno sucederá hasta que se excedan las fuerzas de atracción de Van der Waals. En ese momento, las partículas serán entonces apartadas, creando la dilatación del C-H-S y el consiguiente cambio de volumen. La tensión de desunión se vuelve significativa para humedades relativas por debajo del 50%.

4- Tensión superficial: Para HR por debajo del 50%, donde no puede presentarse la tensión capilar o la tensión de desunión, la contracción por secado se explica por cambios en la tensión superficial. El agua se encuentra bajo presión hidrostática en virtud de su tensión superficial. Esta presión dependerá del área superficial del sólido (Imamoto y Arai 2008, Seisui et al 2010). Como el área superficial del C-S-H es elevada, la tensión superficial puede tomar valores significativos y causar la compresión de las partículas sólidas, generando entonces cambios de volumen.

Los mecanismos descritos anteriormente aportan el marco teórico necesario para comprender los fenómenos por los cuales se producen los cambios de volumen, y por lo tanto resulta necesario su tratamiento. Sin embargo, como consecuencia de su difícil cuantificación y la imposibilidad de establecer con certeza la influencia relativa de cada uno

de ellos, resulta de interés práctico evaluar la contracción por secado en función de la influencia relativa que distintas variables (relación a/c, volumen de pasta, contenido y tipo de agregado, etc.) ejercen sobre la misma.

Los factores que influyen en la contracción por secado pueden dividirse en internos y externos al hormigón. Entre los internos, los más influyentes son la composición del hormigón, el origen de los agregados y el uso de aditivos reductores de agua, mientras que entre los factores externos pueden mencionarse la forma y tamaño del elemento estructural y la humedad relativa ambiente (Neville 1975, Bazant y Wittmann 1982, Aboud-Zeid et al 2001, Gardner y Lockman 2001). Otros factores como el empleo de adiciones minerales, pueden ejercer influencia sobre la contracción por secado del hormigón, sin encontrar hasta el momento un acuerdo generalizado sobre su incidencia relativa.

Entre los factores propios del hormigón que influyen en la contracción por secado, el agregado resulta de mayor importancia por cuanto es el que mayor volumen ocupa en el hormigón a la vez que tiene la función de restringir los cambios volumétricos en la pasta de cemento (Mehta y Monteiro 1998). Con relación al agregado, distintas características del mismo intervienen en la contracción. El tamaño máximo, la forma, textura y distribución granulométrica del agregado no afectan de manera directa la magnitud de la contracción. Sin embargo, para un determinado nivel de consistencia, la modificación de alguna de dichas características del agregado involucra un cambio en el contenido de pasta, y puesto que los cambios volumétricos tienen origen en ella, la contracción última se verá modificada.

El contenido y el módulo de elasticidad del agregado se han postulado como los factores que más afectan la contracción por secado (Neville 1975, Bazant y Wittmann 1982, Mehta y Monteiro 1998, Aboud-Zeid et al 2001). La absorción del agregado puede vincularse con su módulo de elasticidad (Aboud-Zeid et al 2001). En general, agregados con mayor absorción, fruto de su porosidad, tendrán un menor módulo de elasticidad y por tanto el hormigón elaborado con ellos exhibirá una mayor contracción respecto a uno de similares características elaborado con agregados de menor absorción. Sin embargo, agregados con mayor porosidad podrían retener agua durante mayor tiempo y liberarla más lentamente durante el secado. Esto implica que el agua libre de evaporarse esté disponible durante más tiempo y, por lo tanto, el agua adsorbida comenzaría a perderse a una edad posterior en la que el hormigón alcanza una resistencia mayor a la contracción. Este análisis encuentra su justificación a partir de la teoría del agua capilar tratada en párrafos anteriores.

En tal sentido, Neville (1975) relaciona el peso de agua perdida con la contracción por secado en pastas puras y con adición de sílice pulverizado. En estas últimas observó que a pesar de tener una relación a/c mayor, la contracción fue menor. Este comportamiento se produjo como consecuencia de la existencia de cavidades capilares que retuvieron agua y, como fuera discutido en párrafos anteriores, hasta tanto ésta no se pierda, el agua adsorbida no se movilizará, retrasando así la contracción por secado y generando una menor contracción última.

Finalmente, en relación al módulo de elasticidad, agregados con mayor módulo producirán hormigones con menor contracción a igualdad de los restantes parámetros. Al respecto, hormigones elaborados con agregado de acero tuvieron una tercera parte de la contracción que presentaron hormigones de similares características conteniendo agregados naturales, y éstos a su vez una tercera parte de la contracción de hormigones elaborados con esquisto expandido (Neville 1975).

De lo mencionado anteriormente se desprende que a mayor cantidad de agregado en el hormigón menor será el contenido de pasta, y dado que el primero presenta un módulo superior, menor será la contracción por secado (Neville 1975, Bazant y Wittmann 1982, Mehta y Monteiro 1998, Aboud-Zeid et al 2001).

En cuanto a la incidencia de la pasta de cemento en la contracción por secado, pueden mencionarse como factores influyentes su relación a/c y las cantidades relativas de la misma respecto al volumen de agregado.

Para un contenido de cemento dado, con una relación a/c creciente la contracción se incrementa, debido a una mayor porosidad del hormigón resultante (Mehta y Monteiro 1998). Hormigones de una misma relación a/c verán incrementada su contracción al aumentar el contenido de agua, puesto que mayor será el volumen de pasta (Mehta y Monteiro 1998, Aboud-Zeid et al 2001). Al respecto, Bissonnette et al (1996) encontraron una relación entre el volumen de pasta y la contracción por secado. La relación entre el contenido unitario de cemento y la contracción por secado, en función de la cantidad de agua de mezclado y de la relación a/c, se ilustra en la Figura 2.13, de acuerdo al U.S. Bureau of Reclamation (Fava 1968).

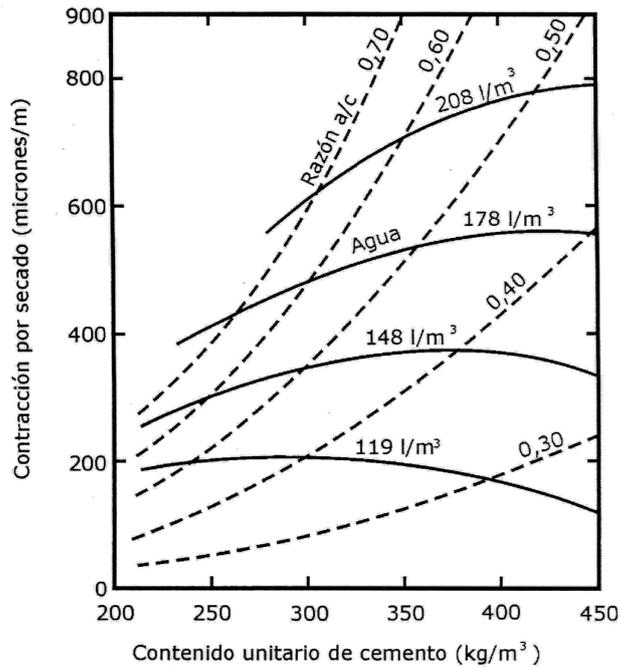


Figura 2.13. Relación entre la contracción por secado, contenido de agua y de cemento y la relación a/c. Adaptado de Fava 1968

Entre los factores externos que intervienen en la contracción por secado, el de mayor influencia es la humedad relativa ambiente, ya que cuando el hormigón está sometido a una humedad relativa por debajo de la de saturación comienza la pérdida de humedad desde su superficie expuesta. Esto inducirá un gradiente en el material, y consecuentemente, la movilización de la humedad por difusión. La relación entre la contracción y la humedad relativa se presentan en la Figura 2.14. Similares resultados a los presentados en la figura fueron informados por diversos autores (Bissonette et al 1996, Ma et al 2007).

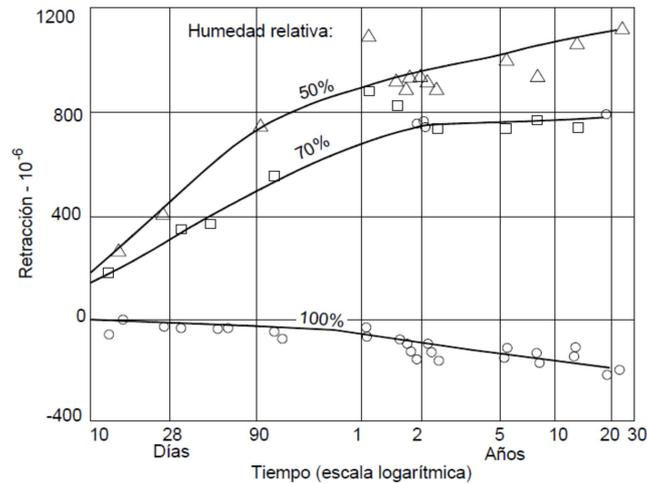


Figura 2.14. Contracción por secado en función de la humedad relativa (Troxel et al 1958)

La forma y tamaño del elemento estructural también tienen influencia en la contracción, puesto que el secado comienza en la superficie del elemento (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1998). Al respecto, distintos autores (Hansen y Mattock 1996, Hobbs y Mears 1971) observaron una relación lineal entre el logaritmo de la contracción y la relación volumen-área superficial del espécimen en estudio. En tal sentido, la contracción última disminuyó conforme se incrementó el tamaño del espécimen.

2.12.1 Contracción por secado en hormigones con agregado fino reciclado

Khatib (2005) evaluó la contracción por secado de hormigones con distintos porcentajes (entre 25 y 100%) de AFR observando un incremento aproximadamente lineal conforme se incrementa el contenido del mismo. Sin embargo, otros autores informan similares niveles de contracción al comparar hormigones elaborados con AFN y con 20 y 30% de AFR (Zega y Di Maio 2011). En dicho caso el comportamiento observado fue atribuido a la menor relación a/c efectiva de los hormigones elaborados con AFR, como consecuencia de su empleo en condición de seco al aire.

Resultados similares fueron informados por Evangelista y de Brito (2004) al evaluar hormigones con sustituciones de hasta el 50%. Ello fue justificado a partir de una menor contracción autógena debido al proporcionamiento de agua interna por parte del AFR. Sin embargo, para las relaciones a/c evaluadas (mayores a 0,40) la contracción autógena resulta despreciable, y por tanto incapaz de justificar el comportamiento reportado por los autores. Para la sustitución total del AFN por AFR los autores reportan un aumento del 80%

de la contracción, hecho que en este caso atribuyen a la menor rigidez del agregado frente al efecto favorable de aporte interno de agua por parte del mismo.

Un mismo nivel de contracción entre hormigones elaborados con AFR y con AFT, independientemente de la relación a/c y el porcentaje en el cual se utilizó el AFR, fue observado en experiencias previas (Sosa et al 2015b). En ellas, se estudiaron hormigones de tres relaciones a/c (0,40, 0,50 y 0,60), con igual contenido de agua de mezclado y distintos porcentajes de AFR (20 y 40%). Los resultados obtenidos pueden justificarse a partir de la consideración de la teoría del agua capilar (zona 1 de la Figura 2.14), es decir, los AFR retuvieron agua en sus poros lo cual retrasó la contracción con la consecuente disminución respecto de los hormigones elaborados con AFT.

Lima y Leite (2012) encontraron un incremento en la contracción de 700 y 2000 $\mu\epsilon$ al utilizar 50% en volumen de AFR en morteros de relación cemento-AF 1:4 y 1:8 (en volumen) respectivamente, con relación a un mortero de referencia (500 $\mu\epsilon$) de igual relación cemento-AF. Al analizar las curvas pérdida de peso-contracción los autores concluyen que existe una gran cantidad de agua en los poros del AFR. Un aumento menos notorio en la contracción fue obtenido por Ravindrarajah y Tam (1987), quienes informaron que la contracción por secado se incrementó en un 40% al utilizar 100% de AFR, respecto del hormigón patrón.

2.13 Conclusiones

En función de lo indicado en la bibliografía sobre las características y propiedades del agregado fino reciclado (AFR), como así también sobre distintas propiedades de morteros y hormigones elaborados con distintos porcentajes del mismo, surge que:

- El AFR, debido a la presencia de mortero adherido en su composición, presenta menor densidad y mayor absorción y rugosidad superficial en comparación con los agregados finos naturales (AFN). Otras propiedades como el contenido de material menor a 75 μm , la forma de sus partículas, la distribución granulométrica e incluso la cantidad de pasta adherida al agregado, parecen depender del proceso de trituración por el cual fueron obtenidos.
- No existe un procedimiento normalizado para la determinación de la absorción en AFRs, distintos métodos han sido propuestos sin lograr su universalización. Es esperable que las distintas variables que intervienen en cada método como así también

los principios en los cuales se fundamentan podrían resultar valores completamente diferentes.

- La elevada absorción del AFR es considerada como la responsable de la mayor consistencia obtenida en morteros y hormigones. Sin embargo, a partir del análisis de la bibliografía y de las distintas variables consideradas en cada caso, la forma y textura superficial de las partículas podrían tener una relevancia aún mayor que la absorción propia del agregado sobre la consistencia de las mezclas.
- En la mayoría de la bibliografía consultada se indica que para sustituciones de hasta un 30% del AFN por AFR, la influencia de este último no resulta significativa.
- La relación entre la resistencia a compresión y la razón a/c total muestra la misma tendencia exponencial que la obtenida en hormigones convencionales. Al considerar dicha relación para la razón a/c efectiva ninguna tendencia pudo establecerse. Resulta necesario entonces, reconsiderar la metodología empleada para compensar la absorción de los agregados teniendo presente la imposibilidad de calcular con certeza la relación a/c efectiva.
- Con relación al comportamiento observado en otras propiedades mecánicas, como las resistencias a tracción indirecta y a flexión, gran parte de la bibliografía señala similitud o incrementos considerables en ambas resistencias al utilizar AFR.
- Respecto al módulo de elasticidad estático del hormigón, la influencia relativa que ejerce sobre el mismo el AFR podría depender del compromiso entre los efectos contrapuestos de su menor módulo de elasticidad y la mejora en la interfaz pasta-agregado que produciría su empleo.
- La durabilidad del hormigón en el que se emplea AFR resulta menor que en aquellos en donde se utiliza AFN. Ello surge de las variaciones observadas en propiedades tales como la absorción, velocidad de succión capilar, ingreso de cloruros, profundidad de carbonatación, etc. No obstante, en la mayoría de los casos se informa que los valores obtenidos en dichas propiedades cumplen con los requisitos establecidos en los reglamentos para hormigones convencionales con requerimientos durables.
- La presencia de pasta de cemento en la composición de los AFR origina una mayor contracción por secado en los hormigones reciclados. Sin embargo, la capacidad del

agregado para retener agua, en función del contenido de humedad en el que se incorporó a la mezcla, podría compensar la menor rigidez del AFR y por lo tanto la mayor contracción. Este hecho permite justificar en cierta medida los resultados contradictorios encontrados en la bibliografía.

2.14 Consideraciones Finales

Del análisis bibliográfico realizado, resulta evidente la necesidad de estudios tendientes a establecer con certeza la influencia relativa de la forma y textura del agregado sobre las propiedades de las mezclas en estado fresco.

Las características de la interfaz pasta-agregado parecen modificarse al emplear AFR. La importancia práctica de esta mejora podría ser beneficiosa frente al comportamiento en compresión, la durabilidad y el comportamiento elástico. Asimismo, resulta necesario el desarrollo de nuevos métodos de diseños de mezclas que contemplen la naturaleza del agregado reciclado.

Resulta necesario un método único y fehaciente para la determinación de la absorción de los AFRs. De otro modo, la metodología empleada para compensar la absorción de los agregados sobre la base de una absorción sub o sobre estimada podría causar una influencia aún mayor que el propio empleo de los AFRs.

La falta de certeza sobre la absorción de los agregados durante el mezclado, sumado a la posible variabilidad de la capacidad de absorción en función del método utilizado para su determinación, imposibilita el cálculo fehaciente de la relación a/c efectiva. La utilización de la relación a/c total para estimar la resistencia a compresión resultaría más adecuada.

El entendimiento certero de la influencia que las características del AFR tengan sobre las distintas propiedades del hormigón, permitirá una solución tecnológica adecuada en cada caso, mientras que la valoración errónea de sus propiedades, como pudiera ser el caso de la absorción, puede dar lugar a soluciones que no serán las óptimas, pudiendo generar además mermas en otras propiedades de las mezclas.

Por otra parte, considerando que en la Argentina gran parte del hormigón que se produce se destina a pavimentos, y que en ellos una de las principales problemáticas se debe a la fisuración producto de la contracción, es de sumo interés establecer la posible

influencia del empleo del AFR. Como fuera discutido en 2.12.1, se ha reportado que el mismo puede disminuir la contracción debido a que aporta agua interna y/o retrasa la eliminación de agua libre y consecuentemente la contracción última. Resulta entonces necesario establecer el comportamiento frente a la contracción por secado de hormigones con AFR.

Capítulo 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Como fuera mencionado en el Capítulo 2, el agregado fino reciclado (AFR) presenta en su composición pasta de cemento adherida a las partículas de agregado natural, hecho que ocasiona que algunas de sus propiedades se vean afectadas no sólo por las características de la roca de origen, sino también por la calidad y composición del hormigón del cual provienen.

Por otra parte, la contracción por secado del hormigón se ve influenciada por distintas características tanto de los agregados como de la pasta de cemento. Entre las que ejercen mayor influencia se pueden mencionar la porosidad, volumen de pasta y módulo de elasticidad del agregado.

Es por lo tanto esperable que al ser el AFR poroso, poseer un módulo de elasticidad menor que el de los AFN, y aportar una cantidad extra de pasta de cemento, genere modificaciones en la contracción por secado cuando se emplea en la elaboración de hormigones en reemplazo de AFNs.

A fin de cumplimentar con los objetivos propuestos en este trabajo de tesis, se planteó la utilización de dos tipos mineralógicos de agregados naturales tanto para el agregado grueso, como para el fino. Los AFRs, en consecuencia, coinciden con los tipos mineralógicos de los agregados gruesos utilizados. La elección de ambas mineralogías responde al intento de universalización de la tesis. Así, la adopción del agregado granítico, el cual presenta una baja absorción, una alta resistencia al desgaste y un elevado módulo de elasticidad responde a la utilización de un agregado de buena calidad. En tanto que el agregado cuarcítico seleccionado posee una elevada absorción, una deficiente resistencia al desgaste y un módulo de elasticidad que lo constituye como un agregado de una calidad mucho menor frente al agregado granítico.

La forma en que se considera la absorción del AFR en la dosificación de las mezclas podría ser la responsable de diferencias en la consistencia y la resistencia a compresión. En tal sentido, la adición al agua de mezclado de la cantidad correspondiente a la absorción del

AR no evita modificaciones en el estado fresco (Lima y Leite 2012), a la vez que podría generar, si no es absorbida por el agregado, modificaciones en la relación a/c con su consecuente impacto en la resistencia a compresión. Por tal motivo, se plantea en esta tesis la utilización de dos metodologías diferentes para evaluar dicha influencia.

En este capítulo se describen los materiales empleados y los métodos experimentales utilizados para la evaluación de distintas propiedades de los agregados y de los morteros y hormigones elaborados. Las características físicas y propiedades de estos materiales se abordarán en el Capítulo 4.

3.2 Materiales

3.2.1 Agregados gruesos

Se utilizaron dos agregados gruesos naturales (AGN) de uso habitual en la Provincia de Buenos Aires, cuya composición y características físico-mecánicas se diferencian entre sí. Los agregados utilizados son de dos mineralogías diferentes, granítica (AGG) y cuarcítica (AGC), cuyas partículas presentan forma irregular y textura superficial rugosa. Ambos tipos de agregados poseen un tamaño nominal 6-20 mm. En la Figura 3.1 se presentan imágenes de dichos AGN, donde se pueden observar las características mencionadas.



Figura 3.1. Agregados gruesos a) Granítico y b) Cuarcítico

Los agregados graníticos de la Provincia de Buenos Aires se caracterizan por ser compactos, de grano medio a grueso con abundante contenido de cuarzo (30-40%), con resistencia a compresión del orden de los 114 MPa y resistencia al desgaste “Los Ángeles” de entre 12 y 20%. Además, poseen baja absorción y, si no se encuentran alterados, una adecuada durabilidad frente a ciclos de humedecimiento y secado.

Los agregados cuarcíticos, por su parte, están constituidos por hasta un 99% de cuarzo, poseen resistencia media a compresión de 86 MPa, elevada absorción de agua y desgaste “Los Ángeles” ($\geq 50\%$), aunque su durabilidad resulta adecuada (Cortelezzi et al 1988, Giaccio y Zerbino 1997).

3.2.2 Agregados finos

3.2.2.1 Agregados finos naturales

Se seleccionaron cuatro tipos de agregados finos naturales: dos arenas silíceas naturales de río (AS), una fina y otra gruesa, y dos arenas de trituración naturales (AFT), de origen granítico (G) y cuarcítico (C).

Para la elaboración de los hormigones, los agregados fueron mezclados en proporciones de 30% de AFT, 28% de AS fina y el restante 42% de AS gruesa. Los porcentajes en que se emplearon los agregados se determinaron a fin de obtener una distribución de tamaños tal que cumpliera con los requisitos establecidos en el CIRSOC 201:2005 para el empleo en hormigones. El porcentaje de AFT utilizado es el máximo permitido por dicho reglamento para la elaboración de hormigones cuando los agregados se obtienen mediante procesos de trituración.

3.2.2.2 Agregados finos reciclados

Se utilizaron cuatro agregados finos reciclados (AFR) obtenidos de la trituración de hormigones de dos relaciones a/c (0,40 y 0,55), elaborados con los dos tipos de agregado grueso natural indicados anteriormente (G y C). La utilización de ambas mineralogías permite evaluar la influencia de la calidad y tipo de AGN del hormigón de origen sobre el AFR obtenido. Asimismo, dichos hormigones fueron elaborados también con un 30% de AFT, de la misma mineralogía que el correspondiente agregado grueso utilizado.

Con cada hormigón convencional se moldearon vigas, las cuales fueron curadas durante 28 días en condiciones de humedad y temperatura controladas ($HR > 95\%$; $T: 23 \pm 2$ °C). Posteriormente se procedió a la trituración de las mismas mediante una trituradora de mandíbulas a fin de generar el agregado reciclado, el cual fue separado en las fracciones gruesa y fina mediante un tamiz de abertura de malla de 4,75 mm. Los agregados retenidos en dicha malla se volvieron a triturar mediante una trituradora de mandíbulas secundaria (la cual produce un agregado de tamaño máximo de 38 mm). Posteriormente se procedió a la

separación de la fracción menor a 4,75 mm y la fracción mayor a dicho tamaño fue nuevamente sometida a trituración. Los AR de tamaño nominal 0-4,75 mm obtenidos del proceso de trituración antes mencionado fueron homogeneizados constituyéndose así los AFRs utilizados en el presente trabajo de tesis. En la Figura 3.2 se presenta el esquema de trituración utilizado. El mismo procedimiento fue empleado para la obtención de cada uno de los cuatro AFR en estudio.

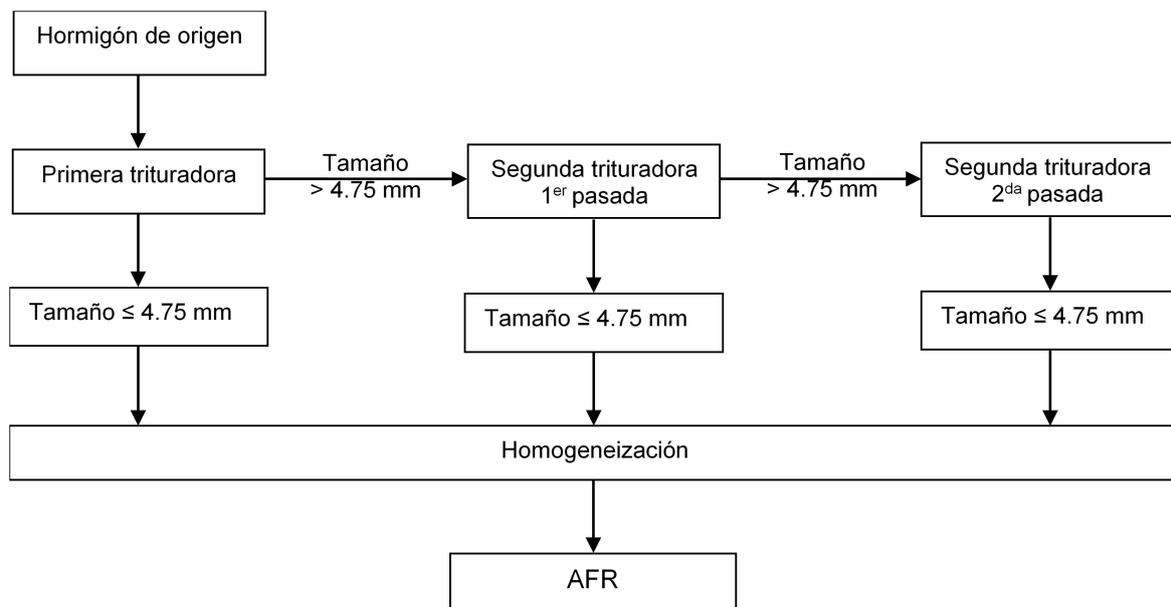


Figura 3.2. Esquema de trituración utilizado para la obtención de los AFR

La nomenclatura utilizada para la denominación de los AFR se compone de la letra R, la cual indica que se trata de AFR seguida por otra letra que indica el tipo de AGN del hormigón de origen, siendo G o C según se trate de AGN de origen granítico o cuarcítico respectivamente. El número que completa la nomenclatura hace referencia a la relación agua-cemento del hormigón del cual proviene el AFR, siendo 4 y 6 para las relaciones a/c 0,40 y 0,55 respectivamente. En la Tabla 3.1 se resumen las denominaciones de los AFR.

Tabla 3.1. Denominación de los AFR

Denominación	Tipo de AGN del hormigón de origen	Relación a/c del hormigón de origen
RG4	Granítico	0,40
RG6		0,55
RC4	Cuarcítico	0,40
RC6		0,55

3.2.3 Otros materiales componentes de las mezclas

Además de los agregados finos y gruesos anteriormente mencionados, se empleó un Cemento Pórtland Fillerizado (CPF40) y dos aditivos reductores de agua, uno de rango medio (plastificante) a base de lignosulfonatos modificados y el otro de alto rango (superplastificante) de base naftaleno sulfonato.

3.3 Morteros

El AFR junto con el resto de los agregados finos empleados, el agua y el cemento constituyen el mortero. Las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero dependerán de las propiedades y proporciones de cada uno de los materiales constituyentes. A su vez, las propiedades del mortero son de gran influencia en el comportamiento ulterior del hormigón, fundamentalmente en el estado fresco. Resulta necesario entonces, el entendimiento de la influencia que el AFR ejerce sobre las características del estado fresco y endurecido de los morteros a fin de establecer, si existiera, correlación entre las características de los morteros y los hormigones en los que se emplea AFR. A tal fin se plantea el estudio de morteros con proporciones de los materiales análogas a la que se utilizaron en los hormigones.

A fin de cumplimentar el objetivo planteado, con cada agregado fino natural y reciclado se elaboraron morteros de dos relaciones a/c (0,40 y 0,55). Los morteros elaborados con agregado fino natural se emplearon como patrones, a fin de establecer comparativamente la influencia que puede tener el empleo del AFR sobre distintas propiedades tanto en estado fresco como endurecido.

En los morteros con AFR se evaluó la incidencia de la forma en que puede compensarse la absorción del AFR, para ello se utilizaron dos metodologías. En una de ellas se compensó la absorción del agregado mediante la adición al agua de mezclado del 80% del agua de absorción a 24hs. La otra metodología consistió en emplear el AFR seco sin considerar la absorción del agregado.

La nomenclatura utilizada para la designación de los morteros se compone de dos términos. El primero de ellos compuesto por una letra y un número; la letra de inicio (M), indica que se trata de morteros, el número que la acompaña hace referencia a la relación a/c utilizada (4 y 6 para la razón a/c 0,40 y 0,55 respectivamente). En el segundo término la nomenclatura se compone de la designación del AFR empleado seguido por una letra que

indica la adición o no al agua de mezclado del 80% de la tasa de absorción. La letra H indica que se ha efectuado dicha adición, mientras que la letra S indica la no compensación de la absorción de los AFRs. En la Tabla 3.2 se presenta la nomenclatura de los morteros elaborados.

Tabla 3.2. Denominación de los morteros elaborados

Denominación	Tipo de AG utilizado	Relación a/c total	Tipo de AFT utilizado	Denominación	Tipo de AF utilizado	Relación a/c total	Tipo de AFT utilizado
M4-NG	GRANÍTICO	0,40	G	M4- NC	CUARCÍTICO	0,46	C
M6-NG		0,55	G	M6-NC		0,62	C
M4-RG4S		0,40	RG4	M4-RC4S		0,45	RC4
M4-RG6S			RG6	M4-RC6S			RC6
M4-RG4H		0,42	RG4	M4-RC4H		0,48	RC4
M4-RG6H		0,43	RG6	M4-RC6H			RC6
M6-RG4S		0,55	RG4	M6-RC4S		0,61	RC4
M6-RG6S			RG6	M6-RC6S			RC6
M6-RG4H		0,58	RG4	M6-RC4H		0,65	RC4
M6-RG6H		0,59	RG6	M6-RC6H		0,66	RC6

3.4 Hormigones

Se elaboraron hormigones convencionales de dos niveles resistentes los cuales se utilizaron como patrones a fin de evaluar de manera comparativa la influencia del AFR sobre distintas propiedades de los mismos. La elección de los niveles resistentes tiene como objetivo establecer si la influencia relativa del AFR guarda relación con la calidad del hormigón en el que se lo emplea. Las proporciones relativas volumétricas entre los hormigones convencionales y aquellos en los que se empleó el AFR se mantuvieron constantes a fin de establecer el empleo del AFR y la forma en que se considera la absorción de los mismos como únicas variables.

3.4.1 Hormigones Convencionales

Con cada tipo de AGN se elaboraron hormigones patrones de diferentes relaciones a/c (0,40 y 0,55) empleando las proporciones de los distintos agregados finos indicadas en 3.2.2.1. La arena de trituración empleada en cada hormigón es de igual origen que el AGN utilizado (G y C). El porcentaje utilizado de AFT (30%) obedece a lo establecido en el Reglamento CIRSOC 201-2005, el cual prevé este límite de empleo para los agregados finos provenientes de la trituración. Tal limitación se debe a las modificaciones en el estado fresco y endurecido que la forma, textura superficial y contenido de polvo de este tipo de agregados pueden originar sobre el hormigón, en comparación con agregados finos que poseen partículas de forma redondeada (Cabrera 2013).

La nomenclatura utilizada para la presentación de resultados es análoga a la utilizada en los morteros. Así, la letra H indica que se trata de hormigones, el número a continuación hace referencia a la relación a/c empleada. El segundo término la mineralogía del AFN utilizado es considerada. En la Tabla 3.3 se indican los hormigones convencionales elaborados, los cuales sirvieron de comparación al momento de evaluar los hormigones reciclados.

Tabla 3.3. Denominación de hormigones patrones

Denominación	Relación a/c total	Relación a/c potencial *	Mineralogía AGN	Mineralogía de AFT
H4-NG	0,40	0,40	Granítico	Granítico
H6-NG	0,55	0,55		
H4-NC	0,46	0,40	Cuarcítico	Cuarcítico
H6-NC	0,62	0,55		

* Considerando la absorción determinada por el método IRAM 1520

3.4.2 Hormigones Reciclados

Cada AFR definido en 3.2.2.2 se empleó en la elaboración de hormigones de dos relaciones a/c (0,40 y 0,55) en el mismo porcentaje en que se utilizó el AFT (30% en volumen). Las proporciones de cada material que compone el agregado fino son las mismas que se definieron en 3.2.2.1. (30% de AFT, 28% de AS fina y 42% de AS gruesa).

Como fuera extensamente tratado en el Capítulo 2 (ver 2.7), la forma en la que se compensa la absorción del AFR en la dosificación del hormigón ejerce gran influencia en las

características del estado fresco y, posiblemente, también en el hormigón endurecido (ver 2.11.5). A fin de evaluar dicha influencia se plantean dos formas de considerar la absorción del AFR. En la primera de ellas se adicionó al agua de mezclado parte del agua de absorción del AFR. La segunda consistió en emplear el AFR seco y utilizar la dosis de aditivo superplastificante necesaria a fin de obtener similar nivel de asentamiento que en el hormigón patrón. La tasa de compensación de la humedad del AFR (mediante la adición al agua de mezclado) fue del 80% del agua correspondiente a la absorción del AFR. Esta tasa fue adoptada en base a lo concluido en la bibliografía (ver 2.11.2).

La nomenclatura utilizada para designar a los hormigones reciclados se compone de dos términos, en el primero de ellos, la letra de inicio (H), indica que se trata de hormigones, el número a continuación indica la relación a/c empleada en los mismos, siendo 4 y 6 para a/c 0,40 y 0,55 respectivamente. En el segundo término la nomenclatura se compone de la designación del AFR empleado (ver Tabla 3.1) seguido por una letra que indica la adición o no al agua de mezclado del 80% de la tasa de absorción. La letra H indica que se ha efectuado la adición, mientras que la letra S indica que no se compensó la absorción del agregado. Para mayor claridad se presenta en la Tabla 3.4 el resumen de los hormigones elaborados con AFR.

Tabla 3.4. Hormigones elaborados con AFR

Denominación	AGN utilizado	Relación a/c total	Relación a/c potencial*	AFR utilizado	Denominación	AGN utilizado	Relación a/c	Relación a/c potencial*	AFR utilizado		
H4-RG4S	Granítico	0,40	0,7	RG4	H4-RC4S	Cuarcítico	0,45	0,37	RC4		
H4-RG6S			0,36	RG4	H4-RC6S			0,36	RC4		
H4-RG4H		0,42	0,40	RG6	H4-RC4H		0,48	0,40	RC6		
H4-RG6H		0,43		RG6	H4-RC6H		0,48		RC6		
H6-RG4S		0,55	0,52	RG4	H6-RC4S		0,61	0,52	RC4		
H6-RG6S				0,51	RG4				H6-RC6S	0,51	RC4
H6-RG4H			0,58	0,55	RG6			H6-RC4H	0,65	0,55	RC6
H6-RC6H			0,59		RG6			H6-RC6H			0,66

* Considerando la absorción determinada por el método IRAM 1520

3.5 Síntesis del programa experimental

Se elaboraron hormigones de dos niveles resistentes diferenciados (relaciones a/c 0,40 y 0,55), empleando dos tipos de agregados gruesos naturales (piedra partida granítica y cuarcítica) y 30% de AFT (en volumen del total del agregado fino). Dichos hormigones fueron luego triturados a fin de obtener cuatro diferentes AFRs, los que fueron acopiados de acuerdo al tipo de agregado natural de origen y su calidad (nivel resistente del hormigón de origen) designándose a los mismos según lo indicado en Tabla 3.1.

Con cada AFR se produjeron 4 morteros y 4 hormigones para cada relación a/c indicada (0,40 y 0,55). Por cada relación a/c y mineralogía de agregado se utilizaron dos calidades de AFR a fin de evaluar la influencia del nivel resistente del hormigón que da origen al AFR en distintas propiedades de morteros y hormigones. Es decir, en cada mortero y hormigón elaborados con AFR la calidad de la matriz en un caso coincidió con la del mortero presente en el AFR y en el otro fue de mejor o peor calidad en función de la relación a/c utilizada.

Complementariamente, a fin de evaluar la influencia de la absorción del AFR en algunas mezclas se utilizó el agregado en condición seca sin considerar la absorción del AFR, y en otras se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente al 80% de la absorción del AFR utilizado.

3.6 Metodologías de Ensayo

3.6.1 Evaluación de los agregados naturales finos y gruesos

Se evaluaron distintas propiedades de los agregados finos y gruesos naturales a emplear, las cuales son requeridas por el reglamento CIRSOC 201:2005 para los agregados que serán empleados en la elaboración de hormigón estructural. En la Tabla 3.5 se indica la normativa IRAM empleada para la evaluación de dichas propiedades.

Tabla 3.5. Normas utilizadas para la caracterización de los agregados

Propiedad evaluada	Norma IRAM	
	Agregado grueso	Agregado fino
Granulometría	IRAM 1505	
Densidad y Absorción de agua	IRAM 1520	
Resistencia al desgaste “Los Angeles”	IRAM 1532	No se determina
Partículas menores a 75 µm	IRAM 1540	
Índice de lajosidad y elongación	IRAM 1687-1 Y 1687-2	No se determina
Durabilidad frente al ataque por sulfato de sodio	No se determinó	IRAM 1525

3.6.2 Evaluación de los agregados finos reciclados

En la República Argentina no existe normativa que contemple la evaluación de los AR, por lo tanto, para la evaluación de las propiedades de los AFR utilizados en este trabajo de tesis se ha utilizado la normativa vigente para AFN indicada en la Tabla 3.5. Complementariamente, para determinar el contenido de pasta presente en la composición de cada AFR, se utilizó el procedimiento normalizado en ASTM D 1084. El mismo consiste en moler una muestra de 2,5 g representativa del AFR, hasta obtener un material de tamaño menor a 150 µm, y someterla a disolución selectiva en ácido clorhídrico al 33%. El complemento del residuo insoluble calculado mediante la ecuación 3.1 constituye el contenido de pasta de la muestra.

$$\text{Contenido de pasta} = 100 - (\text{RI}) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La absorción de los agregados fue determinada de acuerdo a tres diferentes métodos; el método estandarizado en IRAM 1520, el método propuesto por Leite (2001) y el método de la conductividad eléctrica (Carrizo et al 2016). Los principios en que se fundamenta cada método como así también el procedimiento estandarizado o sugerido para su aplicación fueron expuestos en el Capítulo 2 (Ver sección 2.7.1).

3.6.3 Evaluación de otros materiales componentes

Se evaluó el cemento utilizado (CPF 40) de acuerdo a los requisitos especificados en la norma IRAM 50000, la cual comprende las determinaciones de superficie específica Blaine, contenido de material retenido en el tamiz 75 µm, resistencia a compresión y análisis químico, tal como se detalla en la Tabla 3.6. Complementariamente se realizó el ensayo de

fluorescencia de rayos X (FRX). En cuanto a los aditivos utilizados, se les evaluó el residuo sólido y la densidad de acuerdo a IRAM 1663.

Tabla 3.6. Normas utilizadas en la evaluación del cemento

Ensayo	Norma
Análisis químicos	IRAM 1504
Material retenido sobre el Tamiz 75 µm	IRAM 1621
Superficie específica Blaine	IRAM 1623
Resistencia a compresión	IRAM 1622

3.6.4 Evaluación de Morteros

3.6.4.1 Ensayos en estado fresco

A cada mortero elaborado se le determinó la fluidez mediante la mesa de caída libre, la consistencia, el peso por unidad de volumen (PUV) y el aire teórico incorporado.

La fluidez de los morteros se determinó conforme a lo indicado en ASTM C1437. Sin embargo, y teniendo en cuenta experiencias previas (Sosa et al 2012) donde se concluye que la evaluación de la consistencia a través del mini cono de Abrams resulta más adecuada para mezclas de consistencia seca, se determinó también la consistencia mediante dicha metodología conforme NCh 2257-3.

La falta de normativa específica para la evaluación del PUV en morteros motivó la utilización del método análogo empleado en hormigones, utilizando para ello un molde de 311 g de peso y 384,04 cm³ de volumen. El contenido teórico de aire incorporado fue calculado mediante la ecuación 3.2.

$$Aire_t = \frac{PUV_t - PUV_m}{PUV_t} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde:

PUV_t = PUV teórico
 PUV_m = PUV medido
 $Aire_t$ = Aire teórico incorporado

3.6.4.2 Ensayos en estado endurecido

Las propiedades evaluadas en estado endurecido comprenden la densidad, absorción de agua, resistencia a flexión, resistencia a compresión y contracción por secado. En el caso de la densidad y absorción de agua, al no disponer de normativa nacional para la determinación se empleó el procedimiento establecido en ASTM C 642 para hormigones. Las dimensiones de las probetas empleadas fueron de 40 x 40 x 80 mm. La resistencia a flexión y compresión fue evaluada según IRAM 1622 y la contracción por secado de acuerdo a IRAM 1597.

3.6.5 **Evaluación de Hormigones**

3.6.5.1 Ensayos en estado fresco

A cada uno de los hormigones indicados en las Tabla 3.3 y 3.4 se les determinó la consistencia mediante el empleo del cono de Abrams, el peso por unidad de volumen (PUV), el aire incorporado y la exudación, utilizando las normativas que se indican en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Normas empleadas en la caracterización de propiedades de los hormigones en estado fresco

Ensayo	Norma
Consistencia	IRAM 1536
PUV	IRAM 1562
Aire incorporado	IRAM 1602-2
Exudación	IRAM 1604

3.6.5.2 Ensayos en estado Endurecido

Se evaluó la resistencia a tracción por flexión (con carga centrada) de acuerdo al procedimiento establecido en IRAM 1547, para lo cual se emplearon prismas de 70 x 100 x 430 mm. Para la determinación de la resistencia a compresión se utilizaron probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro x 300 mm de altura conforme IRAM 1546. Conjuntamente con la resistencia a compresión se determinó el módulo de elasticidad estático de acuerdo a ASTM C 469, ya que aún no se cuenta con una normativa nacional para su determinación.

En la última modificación del Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201-2005) se incorporó como requisito durable el límite prescriptivo para la velocidad de succión capilar que deben cumplir los hormigones ubicados en distintos tipos de ambiente. Este ensayo tiene una alta sensibilidad frente a los cambios en la estructura de poros del hormigón y ha sido utilizado en esta tesis como parámetro indicador de la durabilidad de los hormigones elaborados. La metodología utilizada para la evaluación de dicha propiedad fue la establecida en IRAM 1871.

La densidad y absorción de agua de los hormigones se determinó de acuerdo al procedimiento establecido en ASTM C 642. El ensayo se realizó sobre muestras de aproximadamente 1dm³ de volumen. Posteriormente se calculó la porosidad del hormigón conforme a la ecuación 3.3.

$$\rho = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_{sum}} \quad (\text{Eq 3.3})$$

Donde:

m_{sss} = masa saturada superficie seca

m_s = masa seca a peso constante

m_{sum} = masa sumergida

Contracción por secado

La contracción por secado se determinó conforme a lo establecido en IRAM 1597 sobre probetas prismáticas de 70 x 100 x 430 mm, las cuales poseen pernos en sus extremos a fin de poder determinar los cambios de longitud. Luego de moldeadas, las probetas se mantuvieron en ambiente de laboratorio durante 24h y posteriormente se trasladaron a un recinto bajo condiciones de temperatura y humedad controladas (23 ± 2°C y HR > 95%) durante 28 días. Cumplido el período de curado, se determinó su longitud (Li) y peso inicial (P0), procediendo luego a estacionarlas en cámara seca con condiciones de humedad y temperatura controlada (20 ± 2°C y HR: 50 ± 5%) durante la duración del ensayo. Los cambios de longitud y de peso se determinaron a edades de 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 270 y 360 días a partir de la finalización del período de curado. La contracción por secado a cada edad se calculó por medio de la ecuación 3.4.

$$\Delta L = \frac{Lx - Li}{Lg} \quad (\text{Eq 3.4})$$

Donde:

ΔL : Cambio de longitud

Lx : Lectura de la probeta a la edad x

Li : Lectura inicial

Lg : Longitud nominal de calibración (250mm)

Capítulo 4

CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se aborda la caracterización de los agregados empleados en la elaboración de los morteros y hormigones especificados en el Capítulo 3. Para ello se utilizó la normativa nacional vigente. En aquellos casos en que la propiedad a evaluar no se encuentre dentro de los ensayos normalizados por IRAM se utilizaron normas o procedimientos internacionales, avalados por estudios previos, como se indicará en cada caso.

4.2. Materiales

4.2.1 Agregados gruesos

Tal como fuera indicado en el Capítulo 3, se emplearon dos agregados gruesos de distinto origen mineralógico: granítico (AGG) y cuarcítico (AGC), los cuales son de uso habitual en la Provincia de Buenos Aires y se obtienen por trituración en cantera. Para ambos agregados se utilizó un tamaño máximo nominal de 19 mm. Se informan a continuación los resultados obtenidos en cada una de las propiedades evaluadas de acuerdo a los requisitos establecidos en la Norma IRAM 1531.

El análisis de la forma y textura superficial se llevó a cabo de manera cualitativa mediante observación visual y lupa binocular.

Ambos agregados, producto del proceso de trituración por el cual fueron obtenidos, presentan forma irregular y textura superficial rugosa. En la Figura 4.1 pueden observarse las características informadas para los agregados de origen a) granítico y b) cuarcítico. Del análisis visual surge que el AGG presenta una angularidad mucho mayor que la del AGC. Este último posee partículas con forma que tienden a ser cúbicas.

La textura superficial de ambos agregados resulta rugosa, presentando el agregado cuarcítico una rugosidad mayor respecto del granítico. Las mencionadas diferencias pueden atribuirse a las características mineralógicas de la roca de origen de las cuales provienen

los AG seleccionados. La Figura 4.1 ha sido seleccionada con el fin de exhibir de manera explícita lo mencionado en los párrafos precedentes.



Figura 4.1. Agregados gruesos: a) granítico, b) cuarcítico

Las granulometrías de los agregados gruesos junto con los límites granulométricos establecidos en el Reglamento CIRSOC 201:2005 para el tamaño máximo indicado (19 mm) se presentan en la Figura 4.2. De la misma surge que ambos agregados presentan curvas granulométricas continuas. El AGC se encuentra dentro de los límites reglamentarios, mientras que el AGG está por fuera de los mismos en los tamices IRAM de 9,5 mm (3/8") y 13,2 mm (1/2"). Sin embargo, y por existir documentación que avala lo establecido en el inciso 3.2.2.4 del Reglamento CIRSOC 201:2005, se procedió a su uso sin modificar la granulometría indicada.

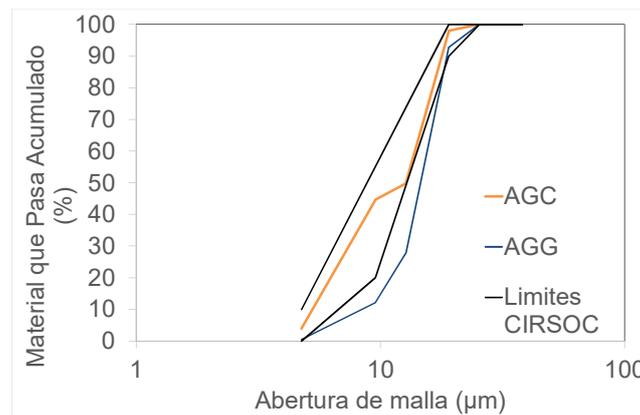


Figura 4.2. Granulometría de los agregados gruesos y límites CIRSOC 201:2005

En la Tabla 4.1 se informan las principales propiedades de los dos tipos de agregados gruesos utilizados. Se observa que conforme a lo tratado en el Capítulo 2, el agregado cuarcítico presenta mayores niveles de absorción (Abs.), desgaste "Los Angeles" y menor densidad ($\bar{\delta}_{ss}$) y peso por unidad de volumen (PUV) respecto del agregado

granítico. Las diferencias señaladas se deben a la distinta mineralogía de los agregados. Respecto de la forma de los mismos, ambos presentan similares índices de lajosidad (IL), y diferencias acotadas en el índice de elongación (IE). Estos resultados indican una forma levemente más angular del agregado granítico respecto del cuarcítico. El volumen de vacíos resultó similar en ambos tipos de agregados.

Tabla 4.1. Propiedades de los agregados gruesos

Agregados	δ_{sss}	Abs. (%)	Desgaste (%)	IL (%)	IE (%)	PUV (kg/m ³)	Vv (%)
AGG	2,71	0,23	22,6	27,1	32,5	1520	44
AGC	2,49	2,66	65,0	25,9	29,1	1430	43

4.2.2 Agregados finos naturales

Se seleccionaron cinco agregados finos naturales (AFN), tres de ellos correspondientes a agregados silíceos de río (AS) y dos agregados finos de trituración (AFT). Entre los primeros se incluyen dos arenas finas (AA y AM) y una arena gruesa (AO), en tanto que los AFT seleccionados son uno de origen granítico (AFTG) y otro cuarcítico (AFTC). Con cada agregado de trituración se elaboraron mezclas empleando 28% de los agregados silíceos finos, 42% de agregado silíceo grueso y 30% de los agregados de trituración, expresado en volumen. Los agregados obtenidos de la mezcla se denominaron NG y NC según fuera utilizado 30% de AFTG o AFTC respectivamente. Para el caso del agregado AFTG se utilizó el agregado fino silíceo denominado AA mientras que para el agregado AFTC el denominado AM.

El empleo de dos tipos diferentes de agregados silíceos finos, en función de la mineralogía del agregado de trituración, obedeció a la disponibilidad de espacio para su almacenamiento, priorizándose como metodología la utilización de un mismo tipo de AS para las mezclas patrones y recicladas.

En la Figura 4.3 se presentan imágenes obtenidas con lupa binocular de los agregados utilizados. Puede observarse que los tres agregados silíceos poseen forma redondeada y textura superficial lisa, mientras que los AFT presentan forma angular y textura superficial rugosa, siendo el AFT granítico más angular que el cuarcítico. Con relación a la textura superficial pudo notarse una mayor rugosidad del agregado cuarcítico respecto del granítico. Las diferencias observadas en ambos AFT son similares a las mencionadas en el caso de los AG de igual origen mineralógico.



Figura 4.3. Imagen con lupa binocular de los agregados finos naturales

Complementariamente y con el fin de establecer de manera cuantitativa las diferencias en la forma y textura del agregado, se realizó el ensayo AASHTO 304, habitualmente utilizado en mezclas asfálticas para determinar el volumen de vacíos. Este volumen de vacíos al ser calculado respecto de una granulometría estandarizada, representa un índice de cuantificación comparativo de la forma y textura de los agregados finos. Debido a la finura que presentan los agregados silíceos no resultó posible generar la distribución de tamaños requerida y, ya que las mezclas de agregados de un mismo origen mineralógico se realizaron con el mismo agregado fino silíceo, dicho ensayo se realizó sólo sobre los AFT.

El AFT cuarcítico presentó un volumen de vacíos del 43% el cual resultó un 3% menor al obtenido en el AFTG (46%). Ello indica (al tener las muestras analizadas la misma distribución de tamaños) que las diferencias observadas se deben a una forma más cúbica y/o una textura superficial más lisa. En el caso particular del agregado AFTC se pudo observar que la textura superficial fue más rugosa respecto del AFTG. Por lo tanto, las diferencias obtenidas deben atribuirse a la preponderancia de la forma más cúbica respecto de la que presentan las partículas de AFTG. La mayor rugosidad que presentan dichos agregados parece no compensar el efecto de la menor angularidad.

En la Figura 4.4 se presentan las granulometrías de a) cada agregado fino natural utilizado, y b) las de cada agregado fino resultante de las mezclas (NC y NG), en los porcentajes mencionados anteriormente, junto con los límites granulométricos indicados en el Reglamento CIRSOC 201:2005. Cada valor informado corresponde al promedio de al menos tres determinaciones independientes. De la figura surge que las combinaciones de agregados (NC y NG) no se encuadran en su totalidad dentro de los límites granulométricos. No obstante, debido a que ambos agregados cumplen con lo estipulado en

el punto 3.2.2.4 de dicho reglamento, pueden ser utilizados en la elaboración de hormigones sin establecer modificaciones en la distribución de tamaños de sus partículas.

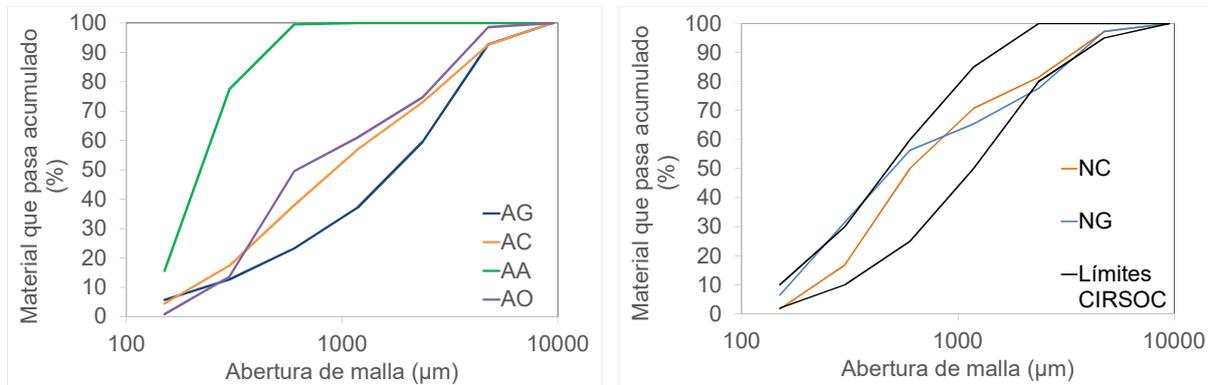


Figura 4.4. Granulometría de los agregados finos naturales

Se observa además en la Figura 4.4 que las granulometrías de cada agregado resultante (NG y NC) difieren bastante entre sí. Estas diferencias pueden explicarse a través de diferentes factores. Por un lado, el agregado silíceo fino (AA y AM) utilizado en las mezclas difiere en su granulometría, (Figura 4.4), lo cual conlleva a una gran influencia sobre la granulometría del agregado resultante al ser su porcentaje mayoritario en la mezcla. Por otra parte, las propiedades de la roca de la cual provienen los AFT, como así también del proceso de trituración por el que fueron obtenidos, podrían ser en parte responsables de las diferencias halladas entre las granulometrías de los agregados resultantes.

En la Tabla 4.2 se presentan las propiedades físicas de los agregados finos naturales utilizados. Se evidencia una clara diferencia entre los agregados silíceos de río y aquellos obtenidos por trituración. Los tres agregados de río (AA, AM y AO) presentan similares densidades, absorciones, PUVs y volúmenes de vacíos. Estas semejanzas se deben a la similitud mineralógica y al origen de los tres agregados.

Por otra parte, el agregado de origen cuarcítico (AFTC) posee mayor absorción y menor densidad y durabilidad que el de origen granítico (AFTG). Estas diferencias al igual que en el caso del agregado grueso deben atribuirse al origen mineralógico de la roca madre. Como fuera discutido en el Capítulo 3, la roca cuarcítica presenta una porosidad mayor que la granítica. En concordancia con la mayor porosidad, el AFTC tiene una absorción 433% mayor que el AFTG. No obstante, pese a la amplitud de esta diferencia

debe tenerse en cuenta que en términos absolutos no resulta del mismo nivel de significancia.

Tabla 4.2. Propiedades de los agregados finos naturales

Agregado	AA	AM	AO	AFTG	AFTC
Módulo de finura	1,08	1,17	3,02	3,59	3,18
Densidad (sss)	2,65	2,65	2,65	2,69	2,58
Absorción (%)	0,5	0,6	0,6	0,6	2,6
Material que pasa el Tamiz 75 μm (%)	0,2	4,5	0,3	4,0	1,5
PUV (Kg/m^3)	1560	1556	1560	1606	1416
Volumen de vacíos (%)	41	41	41	40	45
Durabilidad frente al ataque por sulfato de sodio (%)	5,0	3,2	2,8	2,1	3,1

En el caso del material menor a 75 μm y el módulo de finura, las diferencias podrían deberse al proceso de trituración por el cual fueron obtenidos, cabe mencionar que el AFT cuarcítico es lavado en cantera para eliminar el gran contenido de material menor a 75 μm que se produce durante la trituración.

El PUV y volumen de vacíos (Vv) de los agregados resultan en concordancia con las diferencias observadas en cuanto a forma y textura en los agregados silíceos. Así, los agregados de río (AA, AM y AO) presentan similares PUVs y VVs, en tanto que los PUV de los AFT se encuentran diferenciados entre sí. El AFT de origen granítico presenta un PUV 13% mayor que el de origen cuarcítico y un VV 10% menor. Puesto que el PUV depende de la distribución de tamaños como así también de la forma y textura superficial de las partículas del agregado, las diferencias encontradas deben atribuirse al efecto resultante de dichos factores. En cuanto a la durabilidad de cada agregado, evaluada mediante el ensayo de pérdida de peso por ataque con sulfatos, se observa que en todos los casos los valores obtenidos se encuentran por debajo de lo establecido en la Norma IRAM 1525 (10%).

4.2.3 Agregados finos reciclados

A partir de hormigones de distintos niveles resistentes y con distintas mineralogías del agregado natural se obtuvieron cuatro agregados finos reciclados (AFR) según lo indicado en el Capítulo 3 (3.2.2.2.). Con cada uno de ellos se elaboraron mezclas de agregados, empleándolos en iguales porcentajes a los indicados en el caso de los

agregados finos naturales (28% de agregado silíceo fino, 42% de agregado silíceo grueso y 30% de AFR, en volumen). Al igual que en el caso de los AFN, para el agregado de origen granítico se utilizó el agregado fino denominado AA mientras que para el de origen cuarcítico el denominado AM.

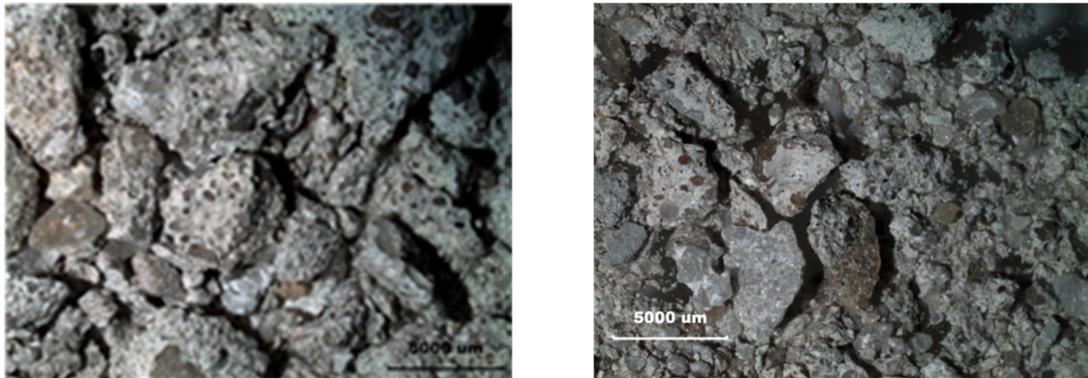
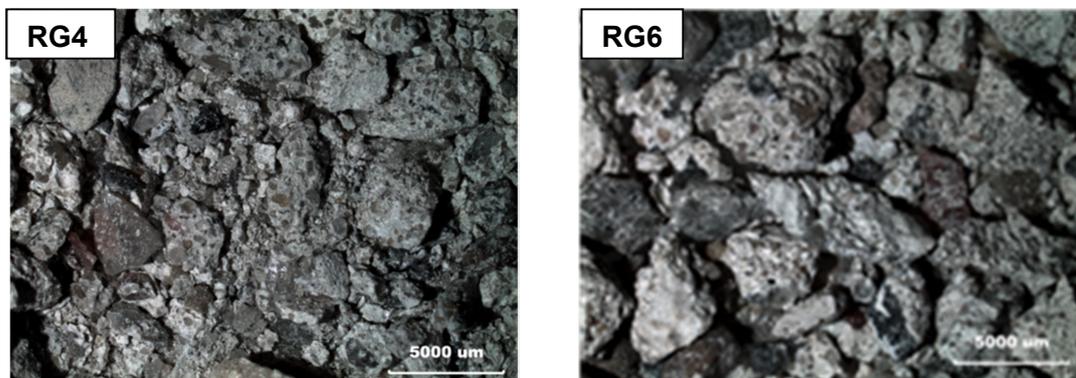


Figura 4.5 se presentan imágenes de los AFR obtenidas mediante lupa binocular. Puede observarse que, al igual que los AFT, los AFR poseen forma angular y textura superficial rugosa. Se observa además que los AFRs graníticos presentan una angularidad mayor que los AFRs cuarcíticos, independientemente del nivel resistente del hormigón del que proceden los mismos. Puesto que para la obtención de los AFRs se utilizó el mismo proceso de trituración, la diferencia antes mencionada puede atribuirse a una mayor adherencia entre el agregado grueso y el mortero del hormigón de origen. Ello produciría menos caras de fractura en el agregado cuarcítico y por tanto una forma más cúbica respecto del AFR granítico.

En cuanto a la textura superficial se observa similitud entre ambos tipos de agregados (cuarcítico y granítico), lo cual probablemente se deba a la pasta adherida a las partículas de los mismos.



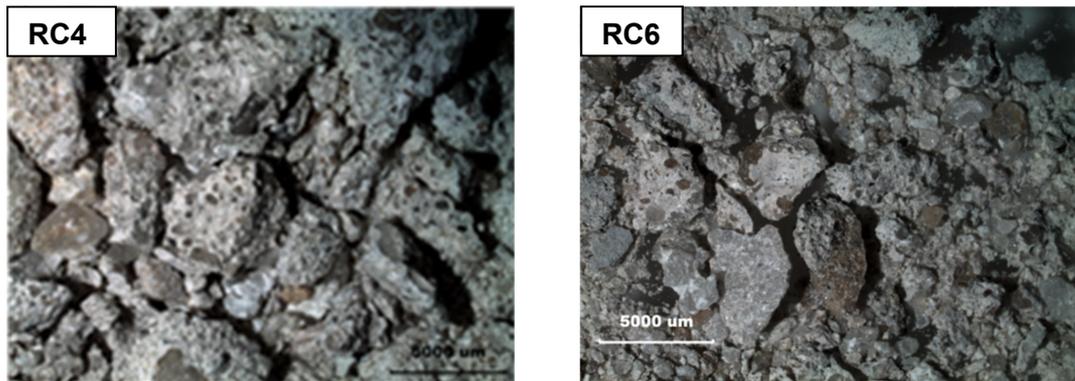


Figura 4.5. Imágenes con lupa binocular de los AFR

En la Figura 4.6 se presenta la distribución de tamaños de a) AFRs y b) de los agregados resultantes de las combinaciones indicadas (la nomenclatura incorpora un asterisco), incluyéndose además en esta última los límites reglamentarios. Puede observarse que las granulometrías de los AFRs resultan similares entre sí independientemente de la mineralogía del agregado y calidad del hormigón de origen. Este hecho, en concordancia con la bibliografía (Hansen y Narud 1983; Ravindrarajah y Tam 1985; Sánchez de Juan 2005), implica que la calidad del hormigón de origen no influye sobre la distribución de tamaños del AFR, siendo ésta función del procesamiento por el cual fueron obtenidos.

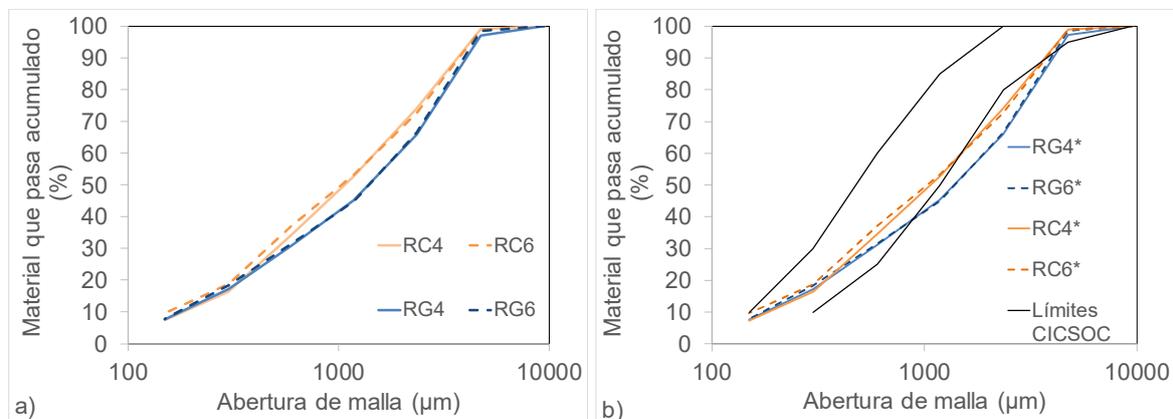


Figura 4.6. Distribución de tamaños de partículas: a) de los AFR, b) de las combinaciones obtenidas

Otro hecho que surge de la Figura 4.6 a) es que, a pesar de estar sometidos al mismo proceso de trituración, los AFRs cuarcíticos presentan un mayor contenido de partículas en los tamaños entre 150 μ m y 600 μ m.

Las propiedades físicas de los AFRs se presentan en la Tabla 4.3. Puede observarse una similitud en los módulos de finura cuando se considera el mismo tipo de agregado del hormigón de origen (cuarcítico o granítico). La absorción de agua por tratarse de un tema con gran relevancia y debido a su gran influencia en la dosificación de mezclas se abordará en una sección independiente.

Puede observarse además que los agregados provenientes de hormigones con una misma relación a/c presentan valores similares de densidad independientemente de la mineralogía del AN que lo compone.

Tabla 4.3. Propiedades de los AFRs

	RG4	RG6	RC4	RC6
Resistencia a compresión del Hormigón de origen (MPa)	45,1	28,6	36,4	25,9
Módulo de finura	3,36	3,32	3,16	3,10
Densidad (sss)	2,48	2,41	2,46	2,40
Material que pasa el Tamiz 75 μm (%)	5,0	7,2	5,2	6,0
PUV (Kg/m^3)	1361	1352	1333	1336
Volumen de Vacíos (%)	45	44	46	44
Volumen de vacíos AASHTO (%)	50	48	47	47
Pérdida por sulfatos (%)	19,8	23,9	21,6	28,1
Porosidad (%)	22,9	56,6	30,7	64,2

Con relación al contenido de material menor a 75 μm , pareciera existir una tendencia inversa con el nivel resistente del hormigón de origen del cual provienen los AFR. En tal sentido, los agregados RG6 y RC6 presentaron un contenido 38 y 23% mayor que los agregados RG4 y RC4 respectivamente. Es posible que el mortero adherido en estos últimos agregados al ser de mayor calidad que el correspondiente a los agregado RG6 y RC6, se produzca un menor contenido de partículas menores a 75 μm . Este hecho resulta en coincidencia con lo reportado en la bibliografía (Florea y Brouwers 2012, Sosa et al 2016) respecto a que para dicho tamaño de partículas se encuentra un mayor contenido de pasta que en la fracción gruesa.

Los PUV de todos los AFR resultaron similares entre sí, particularmente al considerar el mismo tipo de agregado (granítico o cuarcítico), independientemente del nivel resistente del hormigón de origen.

El volumen de vacíos obtenido por el método AASHTO T 304 exhibe similitud entre los agregados evaluados. Estos resultados parecieran contrastar con lo indicado en el análisis visual en el cual se observó una cubicidad mucho mayor en los AFRC respecto de los AFRG. Sin embargo, al analizar tal contradicción, debe tenerse en cuenta que el método AASHTO evalúa de manera conjunta la forma y textura. Es posible entonces que la mayor angulosidad del agregado RG6 se vea compensada por la mayor textura superficial de los agregados reciclados cuarcíticos (RC4 y RC6), y por lo tanto presenten un valor similar del volumen de vacíos evaluado por dicho método, sin que ello implique similitud en la forma y textura de los agregados.

La pérdida frente al ataque con sulfato de sodio de todos los AFR fue ampliamente mayor a la establecida en el Reglamento CIRSOC 201:2005 para los agregados finos naturales. No obstante, es necesario resaltar que dicho ensayo no ha sido desarrollado para agregados reciclados, los cuales a diferencia de los AFN presentan una zona de interfaz fácilmente atacable por la solución de sulfato. Luego del ensayo se observó la separación del mortero que forma parte del AFR del AFN que lo compone. Esta situación no necesariamente ocurrirá cuando el AFR sea utilizado en la elaboración de hormigones, debido a que el mortero nuevo recubrirá al agregado proveyéndole protección.

Por otra parte, la pérdida por ataque con sulfato exhibió una relación inversa con la resistencia del hormigón de origen del cual provienen los AFRs, independientemente de la mineralogía del AGN que lo compone. El mismo comportamiento fue observado al determinar la porosidad de los AFRs. Esto pone de manifiesto lo discutido en párrafos precedentes respecto de la porosidad de la pasta del hormigón de origen y su influencia sobre las propiedades de los AFRs obtenidos a partir de su trituración.

Como fuera tratado en el Capítulo 2 la elevada absorción de agua que presentan los AFRs constituye uno de los mayores inconvenientes para su empleo en hormigones. En esta sección se presentan los resultados obtenidos en sobre dicha propiedad, determinada según tres métodos diferentes.

IRAM 1520: En la Figura 4.7 se presentan los valores de absorción de agua obtenidos juntos con los desvíos estándar. Cada valor informado corresponde al promedio de al menos tres determinaciones.

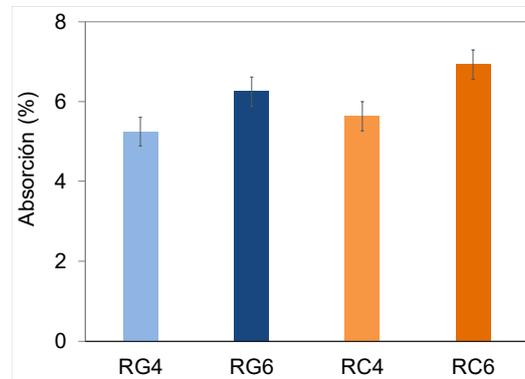


Figura 4.7. Absorción de agua conforme IRAM 1520

Si se comparan las absorciones obtenidas en este caso con las determinadas para los AFT puede observarse que la absorción de los AFRs resulta significativamente mayor a la de aquellos, e incluso superior a la mayoría de los AFN utilizados habitualmente en la industria del hormigón en nuestro país (entre 0,5 y 3%). Para ambos orígenes de agregados, aquellos que provienen del hormigón de mayor relación *a/c* (RG6 y RC6) presentaron una absorción del orden del 20% mayor respecto de los que provienen del hormigón de menor relación *a/c* (RG4 y RC4). Esto indica que la absorción de agua tendría una relación inversa con el nivel resistente del hormigón de origen de los AFR, como consecuencia de la mayor porosidad del mortero que compone el AFR.

Método de Leite (2001): En la Figura 4.8 se presentan las curvas de absorción en función del tiempo obtenidas por el método de Leite (2001). Puede observarse que en concordancia con lo reportado en la bibliografía (Rodríguez et al 2013b) algunas lecturas resultan incoherentes, encontrándose valores de absorción que disminuyen respecto a la lectura anterior. Tal circunstancia puede deberse al aire que podría quedar ocluido sobre el tamiz.

Otro hecho que surge de la Figura es que en los primeros 10 minutos la absorción de todos los AFRs es del orden del 80% de su capacidad de absorción. Adicionalmente al considerar un mismo tipo de agregado reciclado, la absorción obtenida parece corresponderse con el nivel resistente del hormigón que dio origen al AFR.

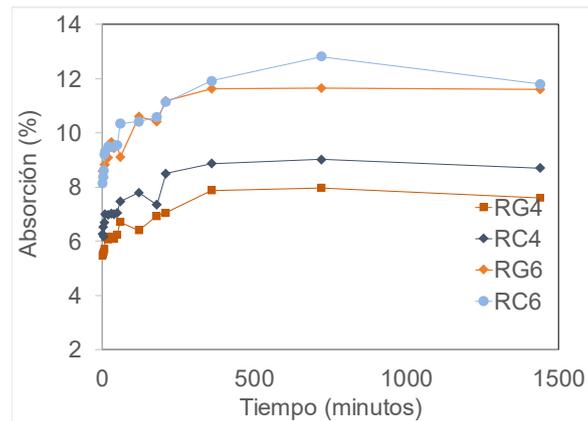


Figura 4.8. Absorción conforme el método de Leite (2001)

Método de la Conductividad eléctrica (Carrizo et al 2016): En la Figura 4.9 se presentan los datos de la absorción obtenida con el método eléctrico. Puede observarse una buena correlación ($R^2 > 0,81$) entre la humedad y la conductividad eléctrica. Se observa además que, en concordancia con los otros métodos utilizados, considerando un mismo tipo de AFR (granítico o cuarcítico) la absorción se incrementa al disminuir el nivel resistente del hormigón de origen.

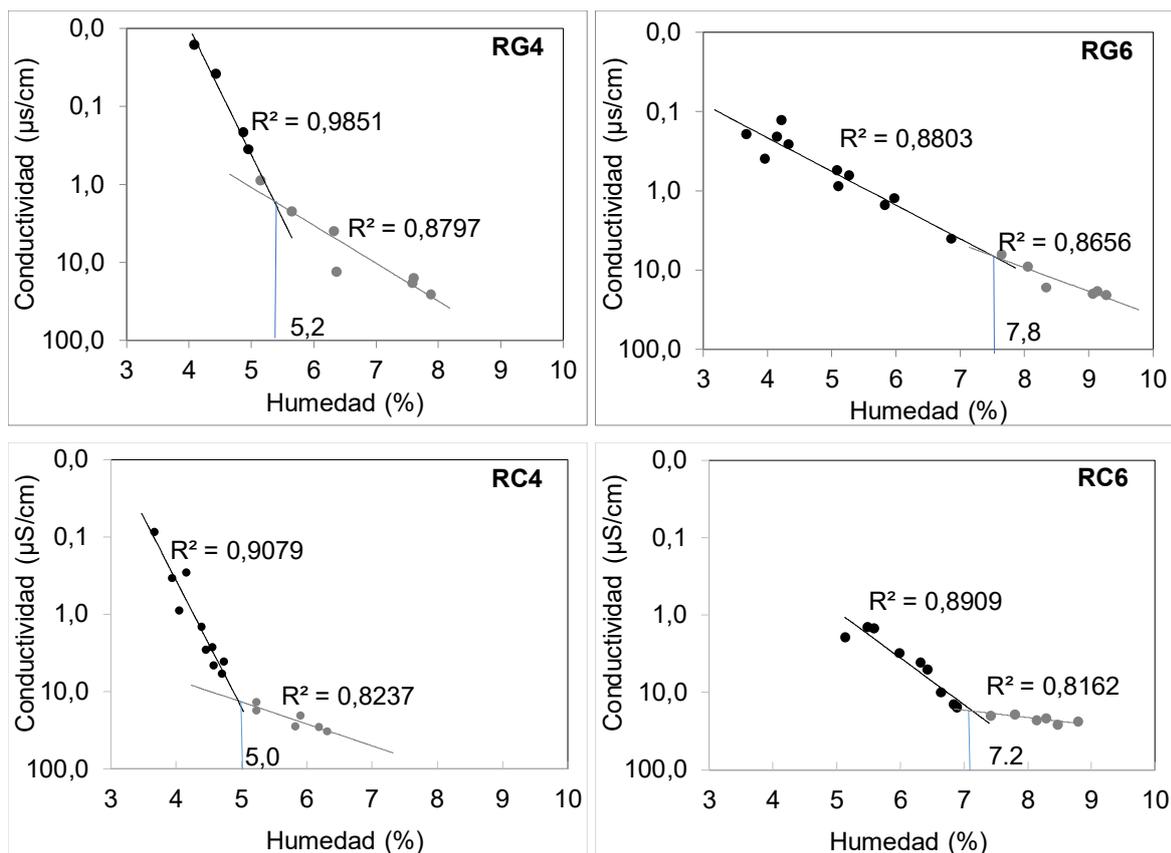


Figura 4.9. Absorción conforme el método eléctrico.

Los valores promedios de la absorción junto con sus respectivos desvíos estándar (valor entre paréntesis) se presentan en la Tabla 4.4. Puede observarse con claridad que los valores de absorción resultan similares entre el método eléctrico y el método IRAM 1520, y significativamente mayores respecto del método de Leite (2001). En tal sentido las diferencias obtenidas entre los distintos métodos son de entre un 19% a un 226%.

Tabla 4.4. Absorción y desvío estándar de los AFRs

Agregado	Método utilizado para evaluar la absorción (%)		
	IRAM 1520	Leite (2001)	Conductividad eléctrica
RG4	5,2 (0,1)	8,7 (0,7)	5,0 (0,2)
RG6	6,2 (0,2)	11,8 (3,3)	7,8 (0,3)
RC4	5,6 (0,1)	7,6 (0,5)	5,2 (0,1)
RC6	6,9 (0,1)	11,6 (2,6)	7,2 (0,2)

En los tres métodos utilizados para evaluar la absorción aquellos agregados que provienen del hormigón de origen de menor nivel resistente presentaron absorciones mayores que provenientes de los hormigones de mayor nivel resistente. Este hecho indica La absorción de agua resulto ser sensible al nivel resistente del hormigón que dio origen a AFRs. Tales diferencias indican que la calidad de la pasta presente en al AFR resulta en una influencia que se evidencia a través de la absorción. Otro hecho que surge de la Tabla es que todos los métodos presentan un bajo desvío estándar.

A cada AFR se le determinó el residuo insoluble mediante ataque con ácido clorhídrico y carbonato de sodio y la pérdida por calcinación (PxC) según ASTM C 1847. Para ello se tomaron muestras representativas de 200 g de cada agregado las cuales fueron molidas manualmente hasta obtener tamaños de partículas menores a 150 µm. Posteriormente se tomaron tres muestras representativas de aproximadamente 2 g, las cuales fueron sometidas a los análisis mencionados. Los resultados obtenidos junto con sus respectivos desvíos estándar se presentan en la Tabla 4.5.

Puede observarse que el contenido de pasta (calculado como el complemento del residuo insoluble) de todos los AFRs se encuentra alrededor del 30%, independientemente del nivel resistente y mineralogía del agregado del hormigón de origen. Si bien la cantidad de AFRs analizados no permiten concluir, los resultados obtenidos harían suponer que la calidad del hormigón de origen no tendría influencia sobre el contenido de pasta del AFR obtenido a partir de su trituración. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la determinación del contenido de pasta se realiza en peso, sin tener en cuenta el volumen de la misma, lo cual aportaría subjetivamente información sobre su calidad.

Tabla 4.5. Contenido de pasta y pérdida por calcinación

Agregado	Contenido de pasta (%)	Pérdida por calcinación (%)	
		550°C	950°C
RG4	31,0 (0,03)	3,12 (0,27)	8,03 (0,21)
RG6	30,5 (0,01)	3,64 (0,09)	9,27 (0,09)
RC4	30,4 (0,05)	3,27 (0,26)	7,26 (0,35)
RC6	27,7 (0,01)	4,24 (0,54)	10,35 (0,29)

Powers (1949) desarrolló un modelo a partir del cual es posible estimar las cantidades de los productos de hidratación y calcular consecuentemente la porosidad capilar de la pasta de cemento hidratada. En el Anexo I se presentan los fundamentos y ecuaciones de dicho modelo que sirven de sustento al cálculo teórico de los volúmenes de los productos de hidratación y su porosidad.

En tal sentido, suponiendo un grado de hidratación del 100% y aplicando el modelo de Powers (1949) a los hormigones en estudio, surge que para el hormigón de relación a/c 0,40 el volumen de los productos sólidos de hidratación es de $267 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mientras que para la relación a/c 0,55 dicho volumen es de $220 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Como el volumen de pasta es igual para ambas relaciones a/c, la porosidad capilar de la pasta de los hormigones elaborados es de 4,23% y 20,82% para las relaciones a/c 0,40 y 0,55 respectivamente. Consecuentemente la pasta de cemento en los hormigones de relación a/c 0,55 posee una porosidad del orden de 500% mayor que la de los hormigones de relación a/c 0,40.

Puesto que el peso de los productos de hidratación es igual a la suma del peso del cemento anhidro (P_c) más el agua combinada (A_c), el peso de los productos de hidratación resulta de $469 \text{ kg}/\text{m}^3$ para los hormigones de relación a/c 0,40 y de $387 \text{ kg}/\text{m}^3$ para los de relación a/c 0,55. Es decir, los hormigones de relación a/c 0,55 poseen una cantidad de productos de hidratación un 17,84% (en peso) menor que los de relación a/c 0,40.

Debido a la mayor porosidad de la pasta de cemento y al menor contenido relativo de productos de hidratación de los hormigones de relación a/c 0,55 respecto de aquellos en que la misma es de 0,40. Resulta evidente que la aparente igualdad en peso del contenido de pasta en los AFRs implica necesariamente un contenido mayor en volumen en los agregados RG6 y RC6 respecto de los RG4 y RC4. Por lo tanto, determinar el contenido de pasta gravimétricamente carece de interés práctico ya que no constituye en sí mismo indicador alguno de la calidad del AFR si no es conocida la dosificación del hormigón de origen.

Adicionalmente debe contemplarse que en los hormigones con agregados cuarcíticos se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente al 80% de la absorción de los agregados naturales. Si dicha cantidad adicional de agua no es absorbida en su totalidad por el agregado, resultaría en diferencias aún mayores a las mencionadas en los párrafos precedentes entre los hormigones elaborados con las dos mineralogías contempladas en este estudio. En tal sentido, suponiendo que no hay absorción por parte

de los agregados, la porosidad de los hormigones con agregados cuarcíticos resulta del 11,23% y 26,61% para las relaciones a/c 0,40 y 0,55 respectivamente. En tanto que el peso de los productos de hidratación resulta igual al calculado considerando la completa absorción de los agregados (469 kg/m³ y 387 kg/m³ para la relación a/c 0,40 y 0,55 respectivamente). Consecuentemente, si los agregados no absorben el agua adicionada las diferencias en la porosidad serían del 265% y 167% para los agregados RC4 y RC6 respecto de los RG4 y RG6 respectivamente.

Por otra parte, la determinación del contenido de pasta no se encuentra normalizada y representa, en los AFRs, un procedimiento laborioso y complejo, que debe ser complementado con otros análisis para establecer subjetivamente la calidad del AFR. Es necesario entonces rever la necesidad supuesta de su determinación como parámetro para establecer la calidad del AFR, como se sugiere en la bibliografía sobre la temática (Zhao et al 2013, Angulo et al 2009).

Respecto de la pérdida por calcinación se observa que la diferencia entre la determinada a 550°C y a 950°C es significativa, lo cual podría indicar un alto grado de carbonatación de la pasta contenida en los agregados. Ello implica que gran parte de la Portlandita, que debería descomponerse a temperaturas de alrededor de 450°C, se ha transformado en calcita, que se descompone alrededor de 650°C. De este modo, gran parte del agua combinada (la contenida en la portlandita que se carbonató) fue liberada al momento de la carbonatación, y por lo tanto pasa a ser agua evaporable a 105°C y no se ve reflejada en la pérdida por calcinación a 550°C. No obstante, debido a que en estos estudios se utilizó un cemento Portland fillerizado, con su consecuente impacto en la determinación de la PxC, este hecho no debe tomarse como definitivo.

4.3 Relación entre propiedades del AFR

En la Figura 4.10 se relacionan distintas propiedades analizadas de los AFR en función del contenido de pasta de cada uno de ellos. Se puede observar que a pesar del relativamente buen ajuste obtenido para la durabilidad frente al ataque con sulfato ($R^2 \geq 0,87$) la distribución de los puntos no resulta suficiente para determinar la existencia de una correlación. La misma consideración puede hacerse para la porosidad y el contenido de material que pasa el tamiz 75 μ m. Estos resultados, por si mismos no permiten concluir respecto de la relación entre las distintas propiedades presentadas en la figura. No obstante, si se considera la distribución de puntos obtenida conjuntamente con las

consideraciones realizadas respecto al contenido de pasta (Ver Anexo I) resulta claro que el contenido de pasta no se encuentra vinculado en forma directa con las propiedades evaluadas.

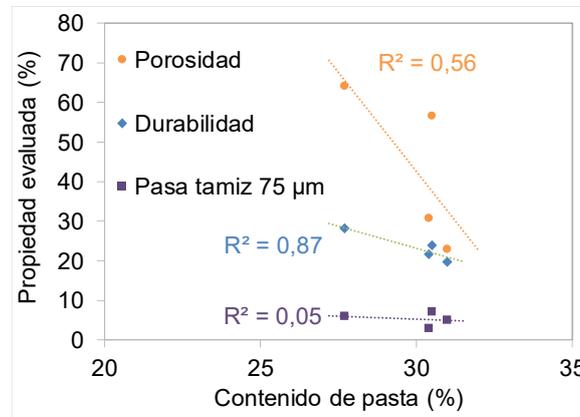


Figura 4.10. Relación entre distintas propiedades y el contenido de pasta de los AFR

La relación entre el contenido de pasta y la absorción por los métodos considerados se presentan en la Figura 4.11. Se observa que ninguna tendencia clara surge entre la absorción y el contenido de pasta. La falta de una relación entre ambas variables debe atribuirse a una mayor influencia de la calidad de la pasta respecto del contenido de la misma que presentan los AFRs.

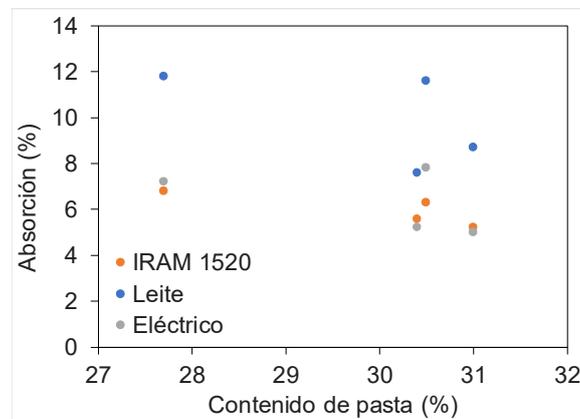


Figura 4.11. Relación entre la absorción y el contenido de pasta

En adición a lo anteriormente tratado cabe mencionar que las propiedades higroscópicas tales como la absorción de agua y la durabilidad frente al ataque por sulfatos se encuentran relacionadas en forma directa con la porosidad de la pasta. Puesto que el contenido de pasta en los AFRs se determina gravimétricamente, resulta claro que el mismo no resulta un indicador directo de las propiedades de los AFRs.

En la Figura 4.12 se presenta la relación entre la resistencia a compresión del hormigón de origen y a) distintas propiedades del hormigón y b) la absorción de agua. Puede observarse que la porosidad y la durabilidad por ataque con sulfato parecen estar relacionadas con el nivel resistente del hormigón que dio origen al AFR. En ambos casos el ajuste obtenido es bueno ($R^2 > 0,83$). Este hecho indicaría que la porosidad y la pérdida frente al ataque con sulfato resultan propiedades sensibles a la calidad del hormigón de origen y consecuentemente de los AFRs. La relación entre el nivel resistente y la absorción de agua presentó un buen ajuste solamente cuando se utilizó el método IRAM 1520 para la determinación de ésta última propiedad.

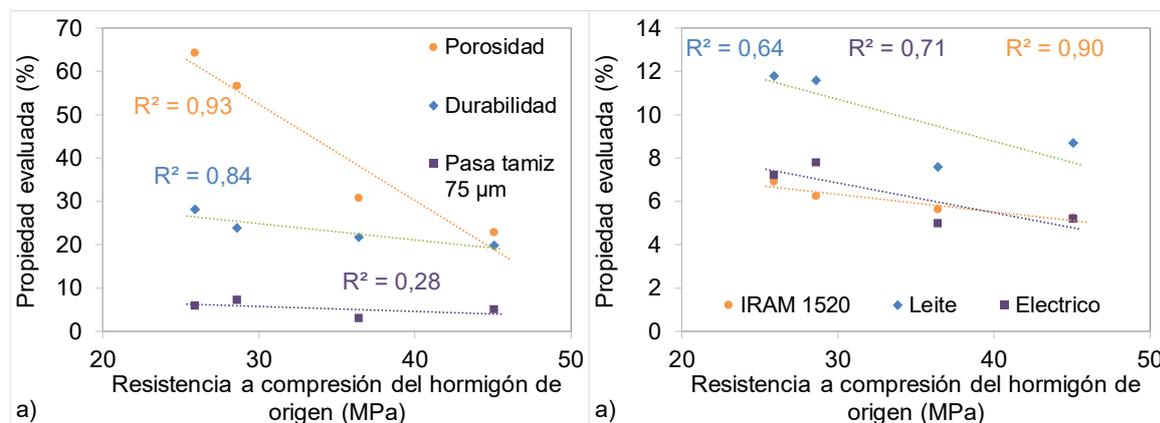


Figura 4.12. Relación entre distintas propiedades de los AFRs y la resistencia a compresión del hormigón de origen

En la Figura 4.13 se presenta la relación entre la porosidad y a) durabilidad frente al ataque con sulfato y el contenido de material menor a 75 µm y b) la absorción de agua. Puede observarse que la pérdida frente al ataque con sulfato presenta una relación lineal con la porosidad. Esta correspondencia entre ambas variables, como fuera mencionado anteriormente, implica que ambos parámetros son un buen indicador de la calidad del AFR. Respecto a la relación entre la porosidad y el contenido de material menor a 75µm, no pudo verificarse una tendencia clara. En contraposición, independientemente del método utilizado para su determinación, la absorción de agua presenta una tendencia a incrementarse conforme lo hace la porosidad del AFRs, presentando nuevamente la metodología de la norma IRAM 1520 la que adquiere la mejor correlación.

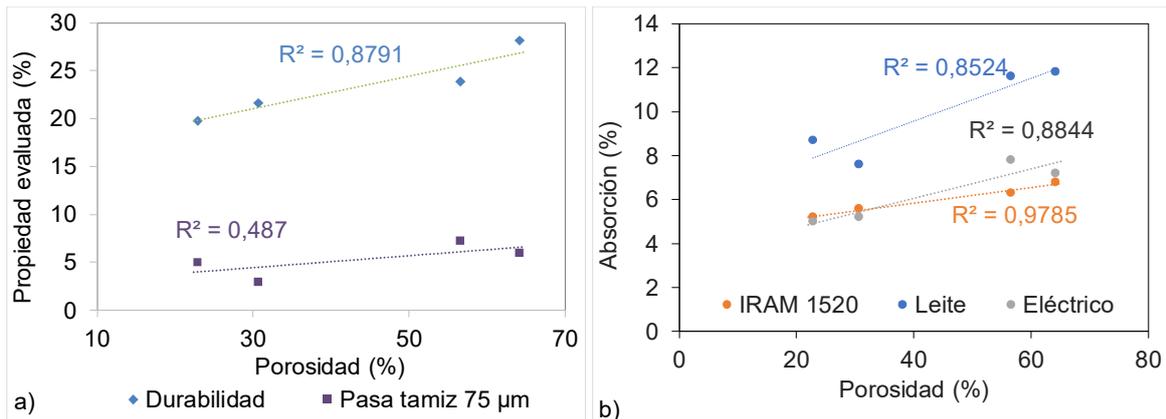


Figura 4.13. Relación entre distintas propiedades y la porosidad de los AFRs

4.4 Análisis comparativo entre AFT y AFR

La forma y textura de los agregados finos resultaron diferentes en función de la mineralogía del agregado natural considerado. Los agregados cuarcíticos, tanto naturales como reciclados, exhibieron una mayor cubicidad frente a los graníticos.

Por otra parte, los AFRC resultaron semejantes en forma a su correspondiente agregado fino natural de referencia, presentando una textura más rugosa. En contraposición, los AFRG mostraron una angularidad mayor y una textura superficial más rugosa que su correspondiente AFN de referencia. No obstante, al evaluar la forma y textura de los agregados mediante el método ASSHTO 304, ninguna de estas diferencias pudo ser comprobada. En tal sentido, a excepción de los agregados NC y RG4, se observó un mismo nivel de volumen de vacíos determinado por el mencionado método.

En la Figura 4.14 se presentan a) las distribuciones de tamaños y b) los módulos de finura de los AFRs relativos a sus correspondientes agregados de referencia. Puede observarse que los AFR cuarcíticos presentan curvas granulométricas muy similares a la del AFTC en los tamaños de partículas entre 4750 y 300 µm. Para los tamaños por debajo de los 300 µm, los AFRCs presentan una cantidad del orden del 71 y 118 % mayor que el AFTC para los RC4 y RC6 respectivamente. Esto se ve reflejado en el módulo de finura que estos agregados presentan, el cual resultó un 5% menor que el del AFTC. En el caso de los AFR graníticos se verifica en términos generales una mayor finura de las partículas que componen los agregados reciclados.

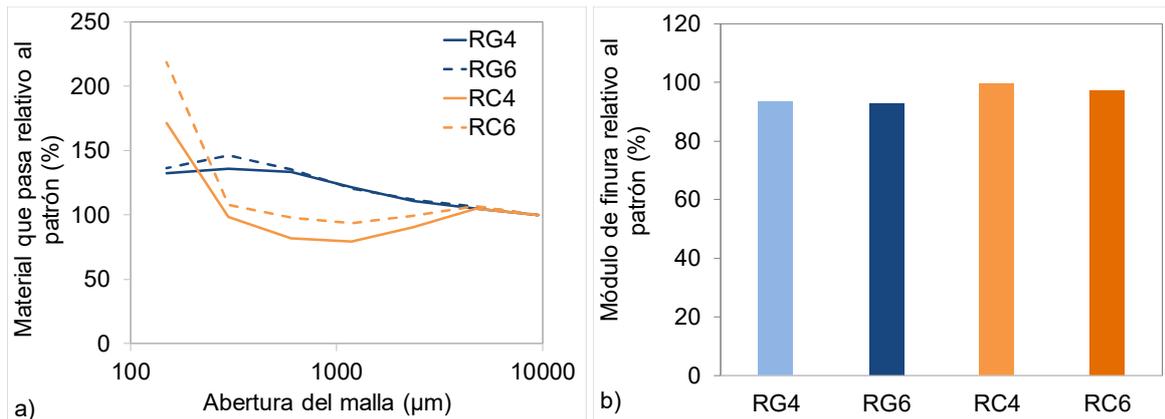


Figura 4.14. Distribución granulométrica y módulos de finura relativos al AFT

La densidad y absorción de agua (determinada mediante IRAM 1520) de los AFRs respecto a la correspondiente de los AFT de referencia se presentan en la Figura 4.15. Se observa que la absorción de los AFR graníticos es un 874% y 1040% mayor que la del AFT granítico para los agregados RG4 y RG6 respectivamente, mientras que en los agregados cuarcíticos es un 220% y 270% mayor que su correspondiente AFT de referencia. Respecto de la densidad se observa una disminución del 8% y 5% para los agregados RG4 y RC4 respectivamente y del 10% y 7% para los agregados RG6 y RC6 respectivamente. Estas diferencias que surgen como consecuencia del mortero presente en el AFR ponen de manifiesto que la absorción resulta la propiedad en la que más se diferencian los AFRs respecto de los AFN.

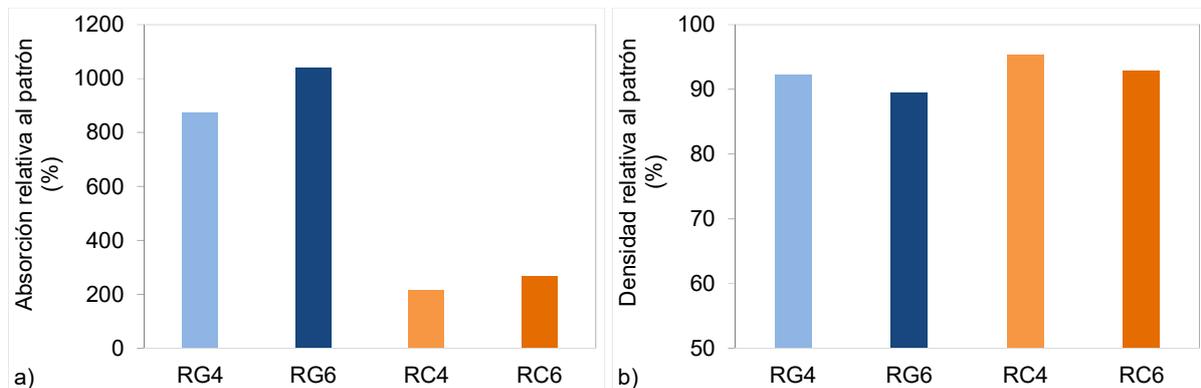


Figura 4.15. a) Absorción y b) densidad relativas al patrón

En ambas propiedades se puede observar un comportamiento más deficiente de los agregados reciclados provenientes de los hormigones de relación a/c 0,55 en comparación con aquellos provenientes de los hormigones con relación a/c 0,40. Este hecho puede ser atribuido a una mayor porosidad en el mortero que poseen los primeros debido a la menor

cantidad de productos de hidratación en el hormigón de origen, como fuera discutido en secciones precedentes.

4.5 Conclusiones

A partir de la evaluación de distintas propiedades de los agregados finos reciclados (AFR) en estudio, como así también de los agregados finos naturales (AFN) y de trituración (AFT) considerados, surge que:

- Los agregados finos silíceos presentaron forma redondeada y textura superficial lisa, en tanto que aquellos obtenidos por trituración presentaron forma angular y textura superficial rugosa. El AFT de mayor angulosidad fue el de origen granítico.
- Los agregados finos reciclados exhibieron mayor angularidad y textura superficial más rugosa que sus correspondientes AFT. No se observaron diferencias apreciables en la forma y textura con relación al nivel resistente del hormigón del cual se obtuvieron los AFRs.
- La calidad y mineralogía del agregado en el hormigón de origen no influyó significativamente en la distribución de tamaños de partículas. El proceso de trituración por el cual se obtuvieron los AFRs resultó determinante respecto de dicha propiedad.
- Las pequeñas diferencias encontradas en la distribución granulométrica de los AFRs sugieren una mayor influencia del origen mineralógico del agregado grueso en comparación con el nivel resistente del hormigón de origen.
- La densidad resultó similar en los AFRs provenientes de los hormigones con igual relación a/c, independientemente de la mineralogía del agregado que los constituía, y entre 5 y 12% menor que el correspondiente AFT de referencia.
- La absorción de los AFRs evidenció diferencias entre un 19% y 226% en función del método utilizado para su determinación. En tal sentido las menores diferencias se encontraron entre los métodos IRAM 1520 y Eléctrico. El método de Leite evidenció en todos los AFRs absorciones significativamente más elevadas que las obtenidas por los otros dos métodos mencionados.
- La absorción de agua de los AFRs fue considerablemente mayor que la obtenida en los AFT. Las diferencias obtenidas ponen de manifiesto que es la propiedad preponderante que diferencia a los AFR de los AFT.

- Se observó una tendencia a incrementarse la absorción de agua de los AFRs conforme disminuye el nivel resistente del hormigón de origen, sólo cuando se utilizó el método estandarizado por IRAM 1520. En los otros métodos de evaluación si bien la tendencia resultó similar, el ajuste obtenido no fue bueno.
- La porosidad y la durabilidad frente al ataque con sulfato resultaron sensibles a la resistencia del hormigón de origen del cual fueron obtenidos los AFRs. Estas dos variables además se encuentran relacionadas en forma directa.
- El contenido de pasta determinado gravimétricamente no puede considerarse como un indicador de las propiedades del AFR, ya que no aporta dato alguno sobre la calidad de los mismos. En tal sentido, si bien el contenido de pasta resultó similar para todos los AFRs (~ 30%), cuando el mismo se calculó en volumen y relativo al volumen de pasta del hormigón de origen, los agregados RG6 y RC6 presentaron un mayor contenido relativo que los RG4 y RC4.
- El contenido de pasta de los AFR no presentó relación alguna con las distintas propiedades evaluadas debido a una influencia mucho mayor de la calidad de la misma frente a la cantidad. Consecuentemente, resulta necesario rever la necesidad práctica de su determinación.
- En los AFRs, el contenido de partículas con tamaño menor a 75 μm fue similar para los provenientes de los hormigones con una misma relación a/c , independientemente del tipo de agregado natural. Los hormigones de relación a/c 0,55 presentaron un mayor contenido que aquellos provenientes de los hormigones de relación a/c 0,40.

Capítulo 5

MORTEROS

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan las proporciones de los materiales empleados en la elaboración de los morteros en estudio, como así también distintas propiedades de los mismos en estado fresco y endurecido. La evaluación de la contracción por secado, por ser objeto de esta tesis, se tratará en una sección independiente al presente capítulo.

Por otra parte, del análisis realizado en los Capítulos 2 y 3 se concluyó que la elevada absorción de los agregados reciclados podría originar modificaciones en el estado fresco de morteros y hormigones. Además, como se discutiera en el Capítulo 4 la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs presenta valores sustancialmente diferentes de la misma. Consecuentemente la corrección de la absorción de los AFRs en la dosificación genera grandes incertidumbres acerca de la relación a/c efectiva.

Por los motivos expuestos y a fin de cuantificar las diferencias que pudieran ocasionar el empleo del agregado fino reciclado (AFR) en distintas propiedades del estado fresco, se utilizaron dos metodologías distintas para el empleo de los mismos las cuales se detallaran al abordar la dosificación de los morteros.

5.2 Dosificación

Se elaboraron dos series de morteros a partir de considerar las dos mineralogías (granítica y cuarcítica) de los agregados naturales definidos en el Capítulo 3. Para cada serie se elaboraron morteros de relaciones a/c 0,40 (M4) y 0,55 (M6).

La mayor absorción de los AFRs respecto de las del AFT puede ocasionar la quita de parte de agua durante la etapa de mezclado. Ello produciría consecuentemente la reducción de la relación a/c inicialmente planteada. El método ACI 211 establece que cuando los agregados no son utilizados en condición saturada superficie seca debe corregirse la cantidad de agua de mezclado. En tal sentido prevé que al utilizar agregados secos al aire o a peso constante de debe adicionar la cantidad de agua correspondiente

para lograr su saturación. Sin embargo, distintos autores (Leite 2001, Rodríguez et al 2013b) han concluido que los AFRs al ser sumergidos absorben en los primeros 10 minutos hasta el 80% de su absorción y por lo tanto dicha tasa de compensación resulta la más adecuada de aplicar. Por otra parte, debe señalarse que Newman (1969) indica que durante el mezclado los AFR no logran su completa saturación. Al respecto Neville (1975) sugiere que el cemento podría obturar los poros del agregado impidiendo su total saturación. Teniendo presente dichas consideraciones y con el fin de estudiar cómo influye la forma en que se considera la absorción como una variable en esta tesis se plantea el uso de dos diferentes metodologías. En una de ellas no se compensó la absorción de los AFRs (determinado conforme a IRAM 1520), empleándolos en estado seco a peso constante (series terminadas en S). La otra metodología consistió en adicionar al agua de mezclado la cantidad correspondiente al 80% de la absorción de cada AFR (series terminadas en H). Esta última metodología fue adoptada con el objetivo de no introducir cambios en la relación a/c efectiva de los morteros. Para ello se adoptó como hipótesis de trabajo que los agregados absorben hasta el 80% de su absorción durante el mezclado, la cual se basa en consideraciones discutidas en el Capítulo 2. Al emplear ambas metodologías es posible considerar los dos casos extremos que pudieran ocurrir durante el mezclado. Uno de ellos será que los AFRs no absorben nada de agua durante el mezclado y el otro extremo es que los mismos logran absorber la cantidad de agua que absorben cuando son sumergidos en agua durante 30 minutos. Es de notar que el caso necesariamente se encuentra entre los dos extremos considerados.

Para cada serie, se emplearon los mismos agregados finos naturales (NG y NC) utilizados como referencia al momento de analizar la influencia de los distintos AFRs bajo estudio. Los AFR de origen granítico (AFRG) y cuarcítico (AFRC) fueron empleados en cada caso en un 30% (en volumen) del total del agregado.

El volumen de pasta se mantuvo constante para todos los morteros, como así también el volumen de agregados. Las pequeñas variaciones en peso obedecen a la diferencia en las densidades de los agregados utilizados (ver sección 4.2.1 y 4.2.2.3) En los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados de un mismo tipo mineralógico, la dosis de aditivos reductores de agua fue mantenida constante. En los morteros de relación a/c 0,55 a fin de obtener similares consistencias que en los morteros de relación a/c 0,40 no se utilizaron aditivos reductores de agua.

En la Tabla 6.1 se presentan las proporciones de todos los morteros elaborados. Cabe señalar que la última letra en la denominación de cada mortero hace referencia a la relación a/c del hormigón de origen del AFR y al modo en que se consideró la absorción del mismo (S: sin compensación de absorción; H: compensación del 80% de la absorción). Se evidencia que en aquellos casos en que se compensó la absorción del agregado, la relación a/c total es del orden del 9% mayor que la relación a/c potencial.

Para la elaboración de los morteros se utilizó una mezcladora Hobart N50 con capacidad de 3 litros. Para el mezclado se siguieron los lineamientos indicados en la norma IRAM 1622. Estos consisten en incorporar el cemento y el agua en la mezcladora, mezclar 30 segundos a velocidad lenta (140 ± 5 vueltas/minuto), luego incorporar el agregado fino con la mezcladora en funcionamiento en un tiempo de 30 segundos. Transcurrido este tiempo se aumenta la velocidad (285 ± 10 vueltas/minuto) y se mezcla durante 30 segundos. Se deja reposar la mezcla durante 90 segundos y luego se procede al mezclado final durante 90 segundos a la última velocidad indicada. Debido a que la citada norma no contempla el empleo de aditivos para la elaboración de los morteros, se decidió seguir el protocolo descrito en IRAM 1622, incorporando el aditivo plastificante junto con el agua de mezclado y el superplastificante en un tiempo de 5 segundos luego de incorporado el agregado fino.

Tabla 5.1. Proporciones de los materiales para la elaboración de morteros (kg/m³)

Morteros	Relación a/c 0,40							Razón a/c potencial *
	Agua	Cemento	AFR	AFN	Aditivo Plastif.	Aditivo Superplastif	Razón a/c total	
M4-NG	238	597	---	1379	3,6	1,8	0,40	0,40
M4-RG4S	238	597	385	957	3,6	1,8	0,40	0,37
M4-RG6S	238	597	374	957	3,6	1,8	0,40	0,37
M4-RG4H	254	597	385	957	3,6	1,8	0,43	0,40
M4-RG6H	257	597	374	957	3,6	1,8	0,43	0,40
M4-NC	242	597	---	1357	3,6	1,8	0,41	0,40
M4-RC4S	238	597	385	957	3,6	1,8	0,40	0,37
M4-RC6S	238	597	372	957	3,6	1,8	0,40	0,37
M4-RC4H	256	597	385	957	3,6	1,8	0,43	0,40
M4-RC6H	259	597	372	957	3,6	1,8	0,43	0,40
Relación a/c 0,55								
M6-NG	273	494	---	1379	---	---	0,55	0,55
M6-RG4S	273	494	385	957	---	---	0,55	0,52
M6-RG6S	273	494	374	957	---	---	0,55	0,52
M6-RG4H	289	494	385	957	---	---	0,58	0,55
M6-RG6H	291	494	374	957	---	---	0,59	0,55
M6-NC	277	494	---	1357	---	---	0,56	0,55
M6-RC4S	273	494	385	957	---	---	0,55	0,51
M6-RC6S	273	494	372	957	---	---	0,55	0,51
M6-RC4H	290	494	385	957	---	---	0,59	0,55
M6-RC6H	293	494	372	957	---	---	0,59	0,55

* Considerando que el agregado absorbe el 80% de su capacidad de absorción determinada mediante el procedimiento indicado en IRAM 1520

5.3 Estado fresco

5.3.1 Extendido

Los resultados del extendido (ASTM C1437) de los morteros de relación a/c 0,40 se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para los agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. En los morteros elaborados con AFRG el extendido resultó en todos los casos menor respecto de los patrones. Cuando no se compensó la absorción del agregado, las diferencias obtenidas respecto del patrón fueron del 30 y 35% para los agregados RG4 y RG6 respectivamente. Al compensar la absorción dicha diferencia resultó del orden del 9 y 13% respectivamente. Contrariamente, en los morteros en que se utilizó el agregado RC el extendido se incrementó en todos los casos, respecto de los morteros patrones.

Para los morteros elaborados con ambos tipos de AFRs (granítico y cuarcítico) se observa que al compensar la absorción del AFR el extendido se incrementó respecto de los morteros en que dicha metodología no fue implementada. Este hecho podría atribuirse al mayor contenido de agua neta, la cual previo a ser absorbida por el agregado, se encuentra disponible para fluidificar la mezcla.

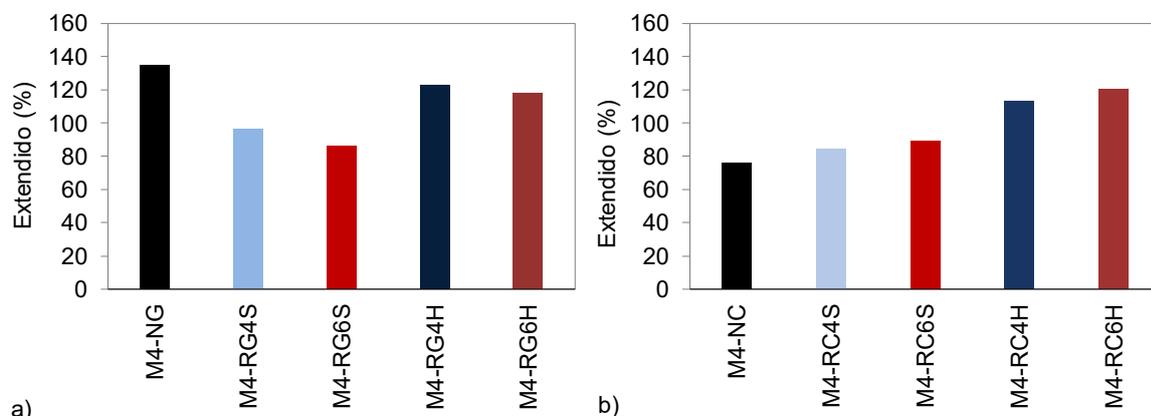


Figura 5.1. Extendido de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Otro hecho relevante que se puede observar en la Figura 5.1 a) es un extendido ligeramente mayor en aquellos morteros elaborados con el AFRG proveniente del hormigón con mayor nivel resistente (M4-RG4), en comparación con los morteros en que se empleó el agregado proveniente del hormigón de menor nivel resistente (M4-RG6). Contrariamente, en los morteros con AFRs cuarcíticos, esta relación se invierte. Sin embargo, en

experiencias previas llevadas a cabo en el LEMIT (Sosa et al 2018) se observó que, en el rango de consistencia obtenidos, en los morteros bajo estudio, resulta más adecuada la evaluación mediante el ensayo de asentamiento (NCh 2257), debido a la falta de sensibilidad que presenta la mesa de caída libre en los rangos de consistencias obtenidos. Por lo tanto, los resultados determinados por este método no deben considerarse concluyentes.

El extendido de los morteros de relación a/c 0,55 se presentan en la Figura 5.2 para los agregados de origen a) granítico y b) cuarcítico. En el caso de los morteros con el agregado RG, con excepción del M6-RG6S, los extendidos resultaron similares entre los morteros con AFR y los de referencia, encontrándose dentro de la variación propia del ensayo indicada en la normativa.

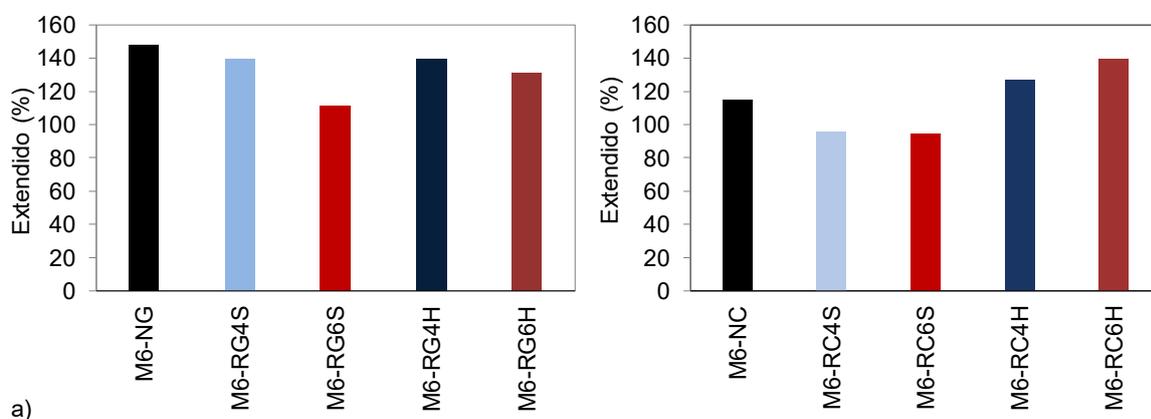


Figura 5.2. Extendido de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Respecto de los morteros con agregado cuarcítico se observó un menor extendido respecto del patrón en aquellos casos en que no se compensó la absorción del AFR. Cuando se realizó dicha compensación (series H) el extendido fue superior (11 y 21% para los agregados RC4 y RC6 respectivamente) que en el mortero de referencia.

En cuanto a la calidad del hormigón de origen del cual provienen los AFRG, en el caso de las series S permanece el mejor comportamiento del RG4 respecto del RG6, mientras que al compensar la absorción de los mismos ambos morteros exhibieron un extendido semejante. En el caso de los morteros con agregados cuarcíticos ninguna tendencia clara respecto de la calidad del hormigón de origen del AFR pudo establecerse.

5.3.2 Asentamiento

En la Figura 5.3 se presentan los asentamientos de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con los agregados a) graníticos y b) cuarcíticos, determinados mediante el procedimiento indicado en la norma NCh 2257.

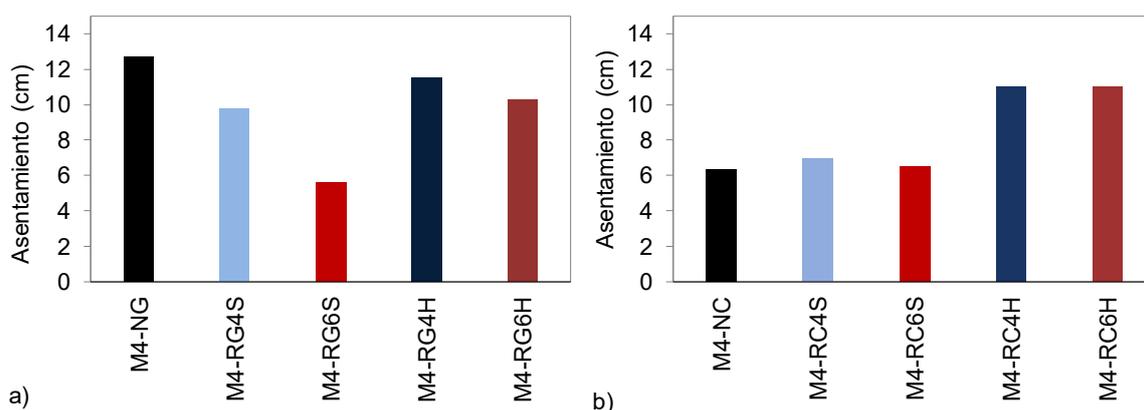


Figura 5.3. Asentamiento de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

En términos generales puede observarse que la consistencia evaluada mediante el asentamiento y el extendido presentaron las mismas tendencias. No obstante, las diferencias entre morteros patrones y reciclados parecieron magnificarse. En tal sentido, las pequeñas diferencias observadas en el extendido en relación al nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs cobraron mayor relevancia en los morteros con AFRs graníticos. Contrariamente, en los morteros elaborados con AFRs cuarcíticos tal variable no ejerció una influencia significativa. Consecuentemente, se desprende que la mineralogía del hormigón de origen resulta en un comportamiento diferencial respecto a la influencia del AFR sobre la consistencia en función del tipo de AFR considerado (granítico o cuarcítico).

Respecto a la forma en que se consideró la absorción del AFR, al igual que lo observado mediante el ensayo de extendido, en los casos que se compensó la absorción del mismo (series H) el asentamiento resultó mayor que cuando esta metodología no fue implementada, para ambos tipos de agregados. Este hecho podría explicarse a través de la mayor cantidad de agua neta que poseen los morteros en que se compensó la absorción de los AFRs (Ver Tabla 5.1, Capítulo 5).

La Figura 5.4 exhibe el asentamiento de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con los agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Cuando no se consideró la absorción del agregado se observa que los asentamientos fueron ligeramente menores a los obtenidos en los morteros de referencia. Cuando se realizó la compensación de absorción del agregado el asentamiento resultó del mismo orden respecto del patrón en los morteros con AFRs graníticos y mayores en los elaborados con AFRs cuarcíticos. Sin embargo, en los niveles de asentamientos obtenidos, resulta más adecuada la evaluación a través del ensayo de extendido debido a la mayor sensibilidad del método en el rango de consistencias fluidas a muy fluidas.

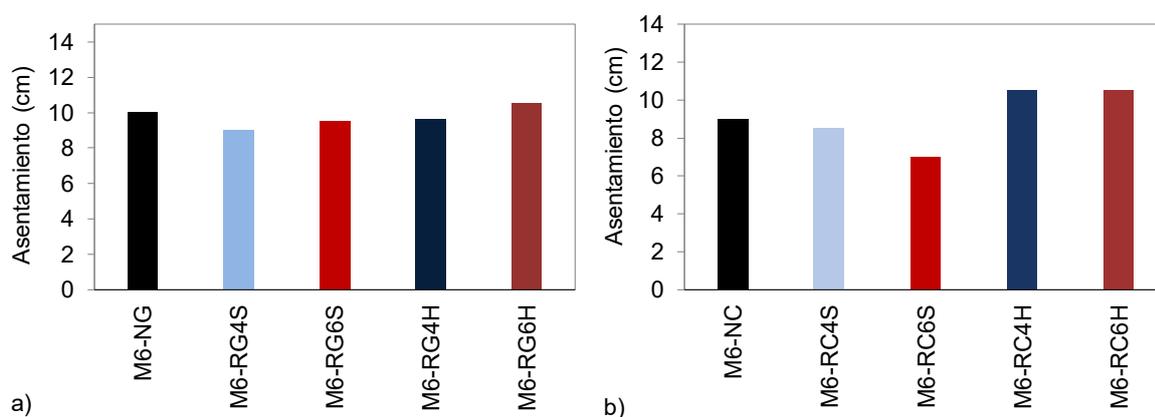


Figura 5.4. Asentamiento de morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Del análisis en conjunto de la fluidez de los morteros (evaluada mediante la mesa de caída libre y el ensayo de asentamiento) surge que la relación a/c de los morteros bajo estudio ejerce una influencia mayor que el empleo de AFRs. Además, se pudo establecer que con el aumento de la relación a/c disminuye la influencia relativa que los AFRs ejercen sobre la consistencia.

La influencia del nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs sobre la consistencia de los morteros no resultó única, sino que parece depender de la mineralogía del hormigón de origen. En tal sentido, en los morteros con AFRs cuarcíticos no se observó influencia alguna del nivel resistente del hormigón de origen, mientras que al emplear los AFRs graníticos RG6 se observó una menor consistencia y/o fluidez de los morteros respecto de los elaborados con los agregados RG4 en referencia al mortero patrón. Adicionalmente, las diferencias obtenidas respecto al patrón fueron mayores para los morteros de relación a/c 0,40 respecto de las obtenidas en los morteros de relación a/c

0,55. Podría establecerse entonces que la mineralogía en el hormigón de origen podría determinar la influencia relativa que los AFRs ejercen sobre la consistencia de los morteros.

Por otra parte, es de notar que aun cuando se compensó la absorción de los AFRs, los morteros elaborados con los AFRs graníticos presentaron una mayor consistencia respecto del mortero patrón. Este hecho podría explicarse a través de las diferencias en la forma y textura del AFRC respecto del agregado natural de referencia (NG), en coincidencia con la mayor angulosidad observada en el análisis mediante lupa binocular (Capítulo 3). Contrariamente, en los AFRC se observó una cubicidad mayor de las partículas de AFR respecto del agregado NC y una textura similar. Estas características van en correspondencia con la mayor fluidez obtenida en los morteros con AFRC, respecto del patrón, independientemente de la consideración o no de la absorción del AFR.

Resulta apropiado entonces indicar, en coincidencia con lo observado por Leite (2013), que la forma y textura del agregado ejercen una influencia significativamente mayor que su propia absorción y, por lo tanto, determinan la influencia relativa que el AFR ejerce sobre la consistencia.

5.3.3 *Peso unitario*

En la Figura 5.5 se presentan los pesos unitarios (PUV) determinados a los morteros en estudio. Surge de la misma que en los morteros con AFR, los PUV resultaron similares al del respectivo mortero de referencia, a pesar de la menor densidad del AFR en relación al agregado fino natural utilizado. Este hecho puede ser atribuido a la escasa diferencia entre las densidades mencionadas y al porcentaje de reemplazo utilizado (30% en volumen).

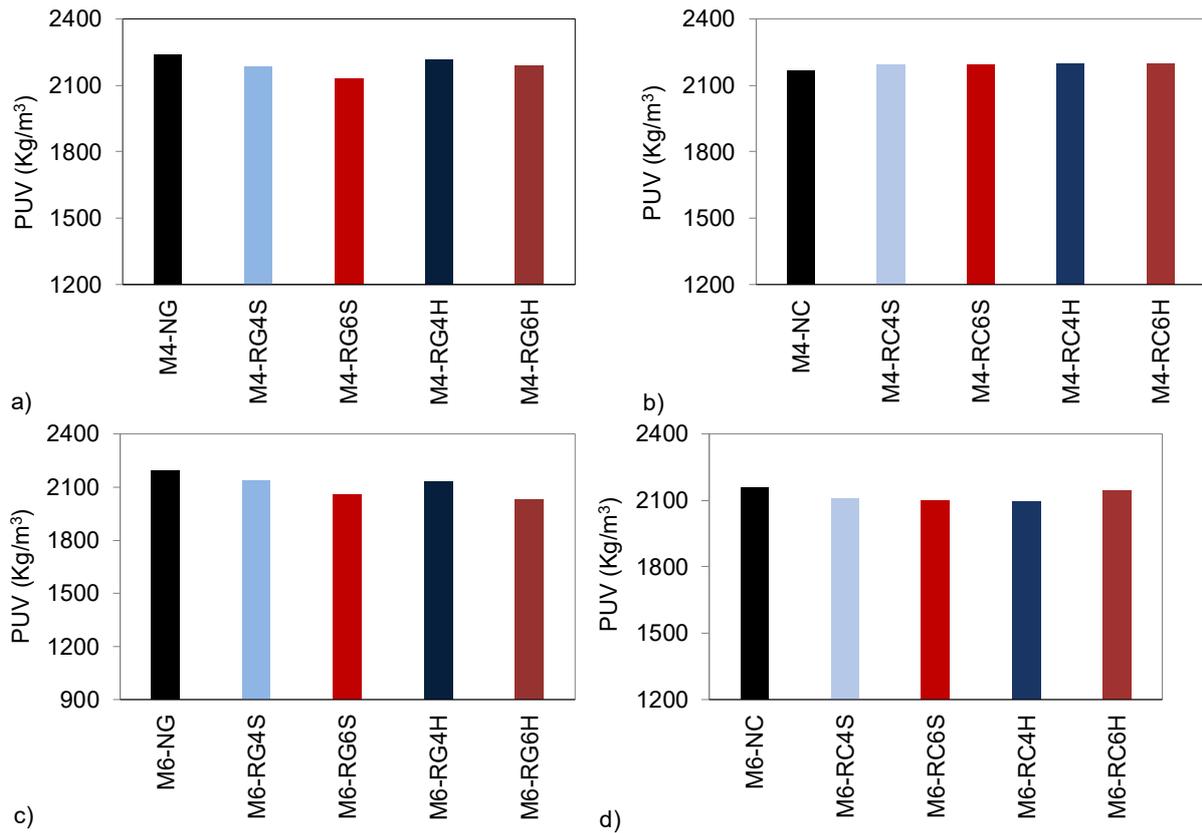


Figura 5.5. Peso unitario de los morteros de relación a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55 elaborados con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarcíticos

5.4 Estado Endurecido

5.4.1 Resistencias Mecánicas

En la Tabla 5.2 se indican las resistencias a compresión (f'_c) y a flexión (f'_f) obtenidas a la edad de 28 días en los diferentes morteros bajo estudio, junto con los respectivos desvíos estándar (s). Cada valor indicado corresponde al promedio de al menos 6 y 3 determinaciones para la resistencia a compresión y a flexión respectivamente.

Puede observarse que tanto en compresión como en flexión el nivel resistente de los morteros con AFRs graníticos es similar al del correspondiente patrón, mientras que en los morteros elaborados con AFRs cuarcíticos se diferencian en el nivel resistente respecto del patrón, especialmente en los morteros de relación a/c 0,55. En todos los casos el desvío estándar se encuentra por debajo de lo indicado en la normativa (IRAM 1622).

Tabla 5.2. Resistencias mecánicas de los morteros en estudio

Mortero	f'c (MPa)	s (MPa)	f _f (MPa)	s (MPa)	Mortero	f'c (MPa)	s (MPa)	f _f (MPa)	s (MPa)
Relación a/c 0,40									
M4-NG	53,6	1,98	8,4	0,31	M4-NC	51,6	2,34	8,0	0,59
M4-RG4S	56,4	2,37	8,4	1,18	M4-RC4S	51,4	1,84	8,1	0,51
M4-RG6S	56,9	1,43	7,5	1,17	M4-RC6S	47,7	5,91	8,0	0,38
M4-RG4H	54,3	1,48	7,7	0,46	M4-RC4H	43,8	5,96	7,7	0,32
M4-RG6H	56,3	2,71	8,6	0,24	M4-RC6H	46,0	2,25	7,9	0,21
Relación a/c 0,55									
M6-NG	26,0	1,10	5,3	0,16	M6-NC	32,7	0,87	6,4	0,38
M6-RG4S	25,9	1,13	5,5	0,67	M6-RC4S	37,3	1,17	6,7	0,23
M6-RG6S	24,9	0,95	6,0	0,64	M6-RC6S	35,4	1,76	5,9	0,13
M6-RG4H	25,8	1,61	5,1	0,24	M6-RC4H	35,0	1,96	6,2	0,41
M6-RG6H	24,4	1,53	5,7	0,48	M6-RC6H	33,2	2,36	5,6	0,47

Los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados naturales (NG y NC) poseen un mismo nivel resistente, mientras que en los de relación a/c 0,55 el nivel resistente de los morteros con agregado cuarcítico es sustancialmente superior al obtenido en el mortero con agregado granítico.

En la Figura 5.6 se presentan las resistencias a compresión relativas al patrón de los morteros de relación a/c 0,40, elaborados con los AFRs a) graníticos y b) cuarcíticos. Puede observarse que en todos los morteros con AFR granítico la resistencia a compresión es del mismo orden que la del patrón o incluso ligeramente superior. Esto evidencia que la forma en que se consideró la absorción de los AFRs no resultó en una influencia significativa sobre la resistencia. Contrariamente, en los morteros en que se usó el AFR cuarcítico se observa un mismo nivel resistente sólo cuando no se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción del agregado. En los morteros en que la absorción de los AFRs fue compensada, la resistencia a compresión obtenida fue de entre un 11 y 15% menor que la del mortero patrón. Otro hecho relevante que surge de la figura es que para los dos tipos de AFR (granítico y cuarcítico), no se observa una influencia significativa de la calidad del hormigón de origen del cual provienen.

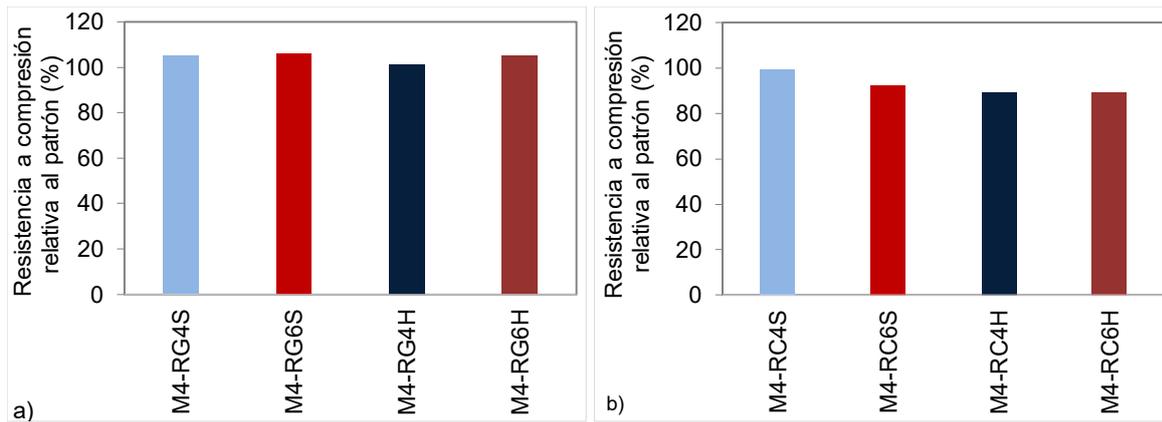


Figura 5.6. Resistencia a compresión relativa de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

La resistencia a compresión de los morteros de relación a/c 0,55, relativa al mortero patrón, se presenta en la Figura 5.7, para los morteros elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Los morteros con AFRs graníticos presentaron similares niveles resistentes respecto del correspondiente patrón. En los morteros con AFRs cuarcíticos las resistencias a compresión resultaron ligeramente mayores que en el patrón.

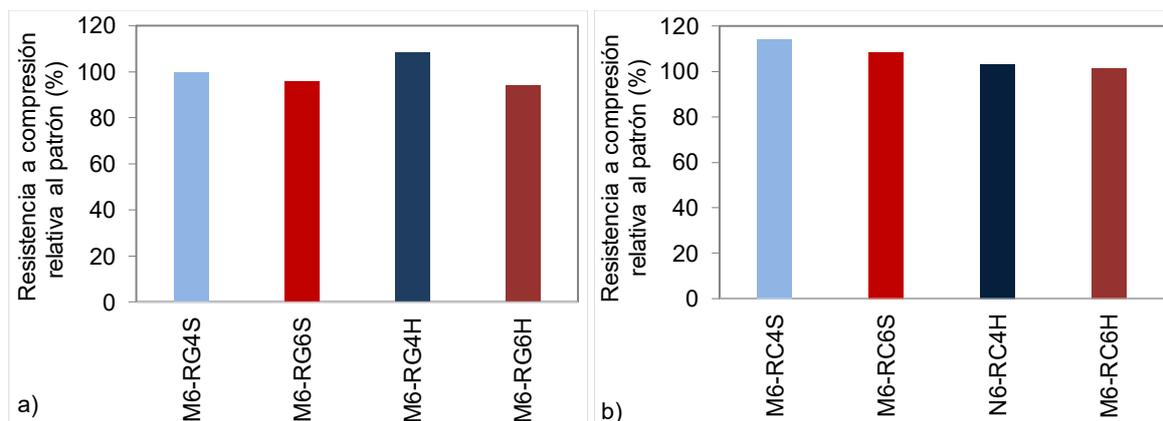


Figura 5.7. Resistencia a compresión relativa de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

En los morteros con AFRs provenientes de los hormigones de origen de menor nivel resistente, las resistencias a compresión fueron algo mayores respecto de los morteros elaborados con los agregados RG4 y RC4. Sin embargo, las diferencias obtenidas se encuentran dentro de la dispersión propia del ensayo. Consecuentemente, debe considerarse que tal variable no resulta en una influencia significativa sobre la resistencia a compresión de los morteros.

Al evaluar integralmente el comportamiento en compresión de los morteros puede concluirse que, en el porcentaje utilizado (30%), no se evidencia una influencia significativa del empleo de AFRs sobre la resistencia a compresión. Asimismo, la calidad del hormigón de origen no resultó un factor determinante respecto a la resistencia a compresión de los morteros elaborados con AFRs.

Cuando se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción del AFR granítico se observó un nivel resistente de los morteros ligeramente inferior respecto del obtenido cuando dicha metodología no fue empleada. No obstante, en virtud de la magnitud de las diferencias observadas podría considerarse que la forma en que se contempló la absorción de los AFRs no resultó en una influencia significativa sobre la resistencia a compresión.

En la Figura 5.8 se presentan las resistencias a flexión relativas a las del patrón de los morteros con AFR de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) granítico y b) cuarcíticos. Surge de la figura que, a excepción del M4-RG6S, los morteros con AFRs graníticos presentan el mismo nivel resistente respecto del mortero de referencia (15% conforme a IRAM 1622). En concordancia con ello, en los morteros con AFR de tipo cuarcítico las resistencias fueron también del mismo orden que la del patrón, independientemente de la calidad del hormigón de origen y la forma en que se consideró la absorción del agregado.

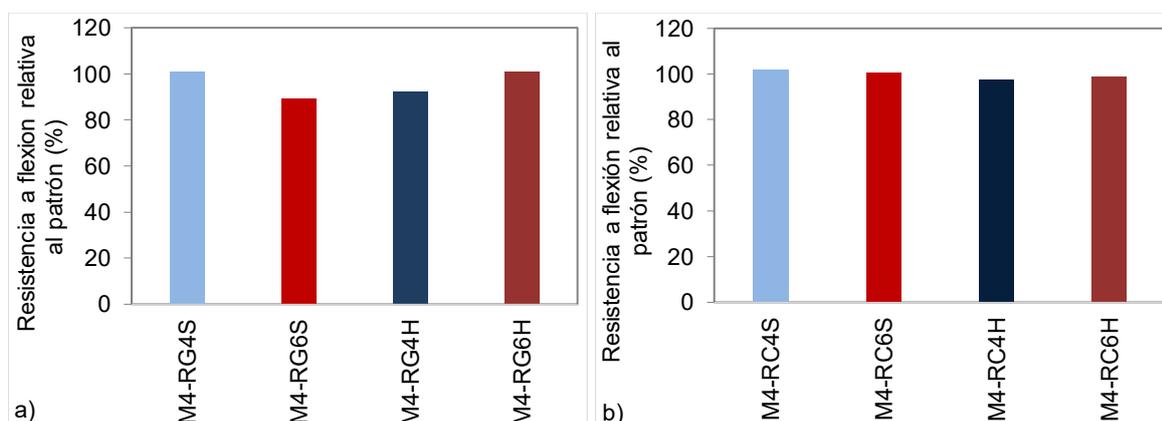


Figura 5.8. Resistencia a flexión relativa de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Las resistencias a flexión de los morteros de relación a/c 0,55 se presentan en la Figura 5.9 para los AFRs a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la misma que en los morteros con agregado granítico las resistencias fueron del mismo orden o ligeramente

mayores que la observada en el mortero patrón. Respecto del nivel resistente del hormigón de origen ninguna tendencia clara puede establecerse. La metodología empleada para compensar la absorción de los agregados no presentó una tendencia definida. En la generalidad de los casos las diferencias son de una magnitud tal que podrían corresponder a la dispersión propia del ensayo. Dicha situación también se observa en los morteros con agregado cuarcítico. En ellos además se observa una menor resistencia en concordancia con la menor resistencia del hormigón de origen de los AFRs utilizados.

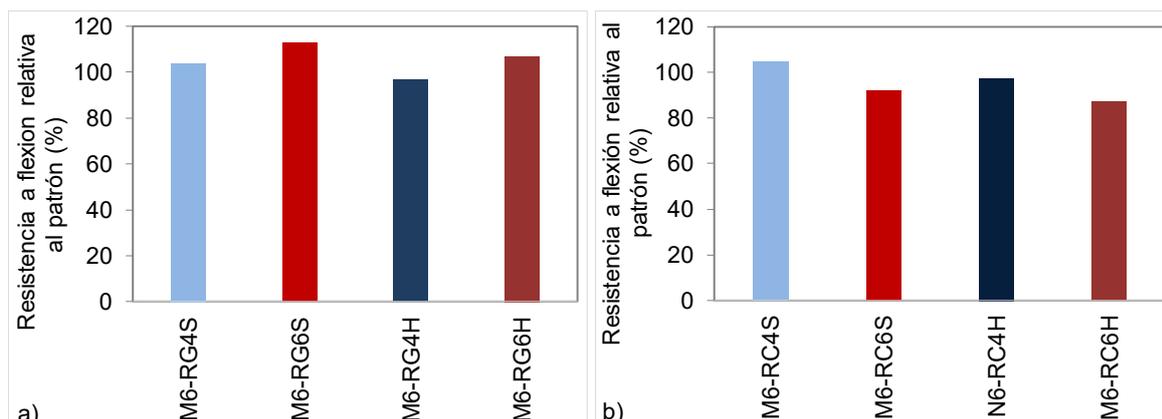


Figura 5.9. Resistencia a flexión relativa de los morteros de relación a/c 0,55 con a) agregado granítico; b) agregado cuarcítico

Del análisis del comportamiento en flexión de los morteros surge que la influencia relativa del AFR es mayor en los morteros de relación a/c 0,40 respecto de los de razón 0,55 para los AFRs graníticos. Contrariamente, en los morteros elaborados con AFRs cuarcíticos la influencia relativa de los mismos resultó mayor para los morteros de relación a/c 0,55 respecto de aquellos en que la misma es de 0,40. Respecto de las variables bajo análisis (nivel resistente, mineralogía del agregado en el hormigón de origen y forma en que se considera la absorción en la dosificación de los morteros) ninguna tendencia clara pudo establecerse.

5.4.2 Densidad y Porosidad

La densidad y la porosidad de los morteros, junto con sus respectivos desvíos estándar, se presentan en la Tabla 5.3. Puede observarse que la porosidad de los morteros con AFR resulta en un comportamiento diferencial según la relación a/c y el tipo de agregado considerado (AFRG o AFRC). En los morteros con AFRG de relación a/c 0,40 se obtuvo una porosidad similar a la del mortero patrón. Cuando no se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a la absorción de los AFRs, mientras que se incrementó en

torno al 10% cuando tal corrección fue realizada. En los morteros con AFRC de dicha relación a/c se observó un ligero aumento de la porosidad (4 y 9% para los morteros con agregado RC4 y RC6 respectivamente) cuando no hubo adición al agua de mezclado. Un aumento significativo (15 y 22% para los morteros con RC4 y RC6 respectivamente) se observó cuando se compensó la absorción de los AFRs. Este comportamiento indica que la adición al agua de mezclado de la correspondiente absorción de los AFRs conlleva a aumentos en la porosidad de los morteros. Cuando esta metodología no fue adoptada la porosidad resultó semejante a la de los morteros patrones.

Tabla 5.3. Densidad y porosidad de los morteros en estudio

Mortero	Densidad		Porosidad (%)		Mortero	Densidad		Porosidad (%)	
	Promedio	Desvío estándar	Promedio	Desvío estándar		Densidad	Desvío estándar	Promedio	Desvío estándar
M4-NG	2,4	0,01	18,3	0,50	M4-NC	2,14	0,02	13,7	0,36
M4-RG4S	2,31	0,01	17,5	0,41	M4-RC4S	2,12	0,01	14,3	0,55
M4-RG6S	2,3	0,01	18,0	0,56	M4-RC6S	2,10	0,01	14,9	0,26
M4-RG4H	2,3	0,02	19,9	0,95	M4-RC4H	2,11	0,01	15,7	0,16
M4-RG6H	2,3	0,01	20,4	0,43	M4-RC6H	2,08	0,00	16,8	0,09
M6-NG	2,3	0,02	21,1	0,06	M6-NC	2,05	0,01	20,8	0,46
M6-RG4S	2,2	0,01	23,1	0,51	M6-RC4S	2,00	0,02	22,5	0,52
M6-RG6S	2,2	0,05	22,6	1,39	M6-RC6S	1,99	0,00	22,4	0,34
M6-RG4H	2,2	0,02	23,0	1,41	M6-RC4H	2,00	0,02	22,9	0,45
M6-RG6H	2,2	0,01	23,6	0,33	M6-RC6H	2,01	0,03	22,8	0,27

En contraposición a lo indicado, en los morteros de relación a/c 0,55 se observó un incremento de la porosidad en torno al 10% respecto del correspondiente mortero patrón, independientemente del tipo de AFR (granítico o cuarcítico) utilizado, la forma en que se consideró la absorción y el nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs.

De la Tabla 5.3 surge que la densidad de los morteros elaborados con AFRs son ligeramente menores que la determinada en el correspondiente mortero patrón. No obstante, las diferencias observadas en ningún caso superan el 3%. Dichas diferencias

podrían atribuirse a la mayor porosidad total del mortero como consecuencia de la mayor porosidad del AFR en comparación con el agregado fino natural. Al respecto la relación densidad-porosidad se ilustra en la Figura 5.10, en donde se observa que la densidad tiende a decrecer conforme aumenta la porosidad.

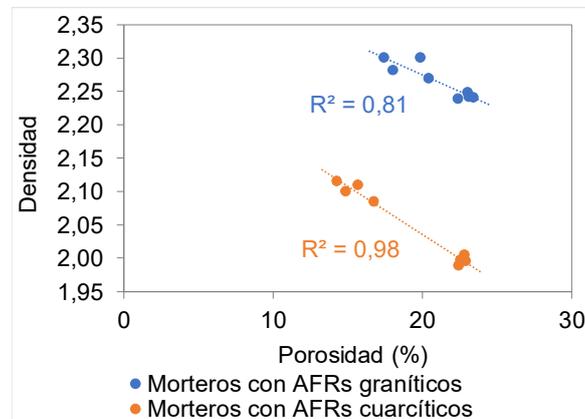


Figura 5.10. Relación densidad-porosidad de los morteros con AFR.

5.4.3 Absorción de agua

En la Figura 5.11 se presenta la absorción de agua de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con los AFR de tipo granítico a) y b) cuarcítico. Surge de la misma que en los morteros en que la absorción del AFR no fue considerada (series S), los morteros con AFR presentaron similares niveles de absorción respecto al mortero de referencia. Cuando se utilizó como metodología la compensación de agua de los AFR, la absorción se incrementó respecto de los patrones. Otro hecho que surge de la figura es que, tanto para las series S como para las H, los morteros con AFR provenientes de la trituración de hormigones de menor nivel resistente (agregados RG6 y RC6) presentaron una mayor absorción que la correspondiente a los que provienen del hormigón con mayor nivel resistente (agregados RG4 y RC4).

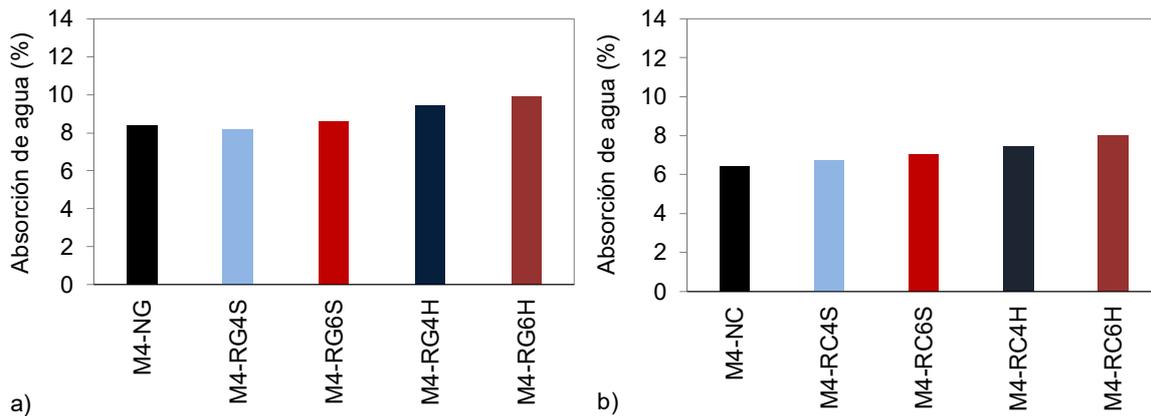


Figura 5.11. Absorción de agua de los morteros de relación a/c 0,40 para los agregados a) granítico y b) cuarzítico

En la Figura 5.12 se presenta la absorción para los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con AFRs a) graníticos y b) cuarzíticos. Surge de la misma que la absorción en los morteros reciclados es mayor que la obtenida en los correspondientes patrones. A diferencia de los morteros de relación a/c 0,40 la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs como así también el nivel resistente del hormigón de origen no resultaron en una influencia significativa en la absorción, ya que todos los morteros con AFRs presentan similar nivel de absorción.

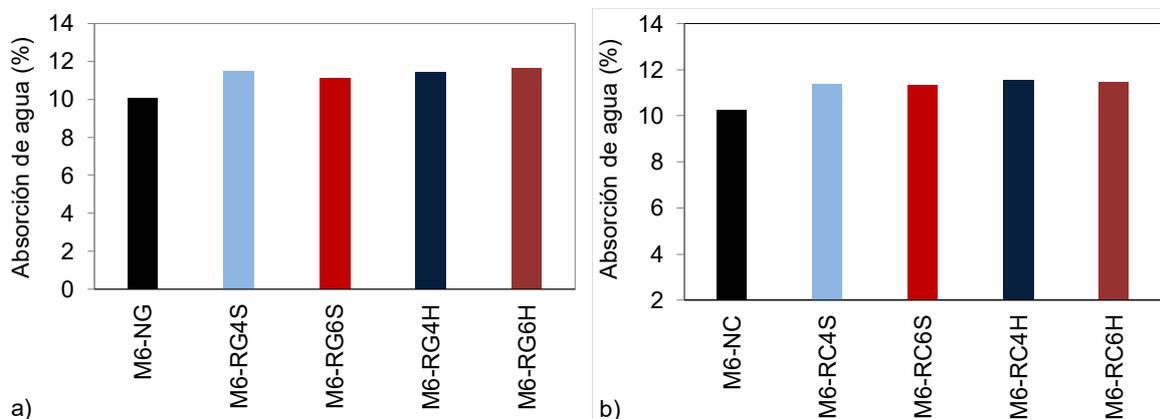


Figura 5.12. Absorción de agua de los morteros de relación a/c 0,55 para los agregados a) granítico y b) cuarzítico

Del análisis de la absorción en los morteros surge que la relación a/c presenta una influencia mucho mayor que el empleo del AFR. En tal sentido el nivel resistente del hormigón de origen, como así también la metodología empleada para considerar la absorción ejercen una pequeña influencia en la absorción en los morteros de relación a/c 0,40 y ninguna influencia observable en los de relación a/c 0,55. Sin embargo en estos

últimos el empleo de AFRs presentó un incremento en la absorción del 20% respecto del patrón.

5.5 Conclusiones

A partir de las dosificaciones planteadas y los resultados obtenidos en las distintas propiedades evaluadas en los morteros puede concluirse que:

- El agregado fino reciclado de tipo granítico (RG) aumentó la consistencia de los morteros respecto del patrón, aun cuando se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a una tasa de absorción del 80%. Contrariamente en los morteros reciclados con agregados de tipo cuarcítico (RC) se observó un mayor asentamiento respecto del obtenido en los patrones.
- El nivel resistente del hormigón de origen del AFR parece influir sobre la consistencia de los morteros sólo en aquellos casos en que no se contempla la absorción de los mismos.
- La forma y textura superficial de las partículas de los AFRs podrían ejercer una influencia relativa mayor sobre la consistencia de los morteros que la propia absorción del AFR. En tal sentido las diferencias frente al AFN utilizado como patrón podrían determinar la influencia relativa del empleo del AFRs en la consistencia.
- La metodología utilizada para la evaluación de la consistencia en los morteros debe considerarse en función del grado de consistencia, de otro modo los resultados obtenidos podrían llevar a conclusiones erróneas respecto de la influencia del empleo de AFRs. Resulta entonces adecuada la evaluación mediante la mesa de caída libre para las consistencias secas, mientras que para las consistencias plásticas el ensayo de asentamiento muestra una mayor sensibilidad.
- El PUV de todos los morteros con AFR resultó similar al de los morteros de referencia, independientemente de la mineralogía, calidad y forma de considerar la absorción de los AFRs. En todos los casos las diferencias obtenidas fueron menores al 3% para los RC y del 5% para los RG. Estas diferencias se encuentran dentro de la dispersión propia del ensayo indicada en la normativa. Por tal motivo ninguna tendencia clara de las variables bajo estudio pudo ser establecida

- La resistencia a compresión de los morteros con AFRs resultó del mismo orden que la del correspondiente patrón. El nivel resistente, la mineralogía del agregado, así como la forma en que se consideró la absorción de los mismos en la dosificación no resultaron variables determinantes respecto de la resistencia a compresión de los morteros elaborados.
- La resistencia a flexión de los morteros no resultó sustancialmente afectada por el empleo de los AFRs. En todos los casos se obtuvieron similares niveles resistentes para los morteros patrones y reciclados. Ninguna tendencia clara respecto de las variables bajo análisis pudo ser establecida.
- La porosidad mostró un comportamiento diferencial en función de la relación a/c de los morteros elaborados. En los morteros de relación a/c 0,40 la adición al agua de mezclado de la absorción de los AFR causa incrementos en la porosidad respecto a cuando dicha metodología no fue empleada. Para los morteros de relación a/c 0,55 se observó un incremento de la porosidad del orden del 10% respecto al patrón independientemente de las variables bajo análisis.
- Las densidades de los morteros con AFRs resultaron ligeramente inferiores que las de los morteros de referencia. Las diferencias encontradas en ningún caso superaron el 3%. La disminución en las densidades se atribuye a la mayor porosidad de los morteros elaborados con AFRs, las cuales mostraron una buena correlación con la porosidad de los morteros.

Capítulo 6

HORMIGONES

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las proporciones de los materiales empleados para la elaboración de los hormigones en estudio, como así también los resultados obtenidos en la evaluación de distintas propiedades en estado fresco y endurecido. La contracción por secado, a pesar de ser una propiedad del estado endurecido, se tratará en un apartado independiente, por ser el objeto de esta tesis.

Para el proporcionamiento de los materiales componentes del hormigón se siguieron los mismos lineamientos establecidos para el caso de los morteros. Así entonces, tanto el volumen de pasta como el de agregados, fueron mantenidos constantes en todos los hormigones. Las pequeñas variaciones en los pesos de los agregados, obedecen a las diferencias en las densidades de los mismos (ver Capítulo 3).

6.2 *Dosificación*

Los volúmenes de pasta y de agregados fueron mantenidos constantes en todos los hormigones. En el caso de los hormigones con AFR, el porcentaje utilizado es el mismo que el empleado para el agregado fino de trituración, es decir, 30% en volumen del total de agregado fino. Las pequeñas diferencias que se observan en el peso de los agregados y del agua utilizada obedecen en el primer caso a las diferentes densidades de cada agregado. Los distintos contenidos de agua se deben a la forma en que se considera la absorción de los agregados, según las dos metodologías planteadas. Las mismas consisten en suponer que los agregados absorben el 80% de su capacidad de absorción (determinada conforme a IRAM 1520) durante el mezclado, esta formulación se basa en consideraciones discutidas en el Capítulo 2. La otra metodología consiste en emplear el agregado seco sin la adición al agua de mezclado considerando que el agregado no absorbe agua durante el mezclado. Para esta metodología se compensó solamente la absorción del agregado natural. El utilizar ambas metodologías supone el empleo de distintas cantidades de agua de mezclado y, consecuentemente, de diferentes relaciones a/c potenciales. No obstante, y como ambas metodologías son las más empleadas a nivel internacional, su utilización supone una buena

práctica para analizar los beneficios y problemáticas que una u otra metodología pudiera ocasionar.

En tal sentido, debido a la mayor absorción que presentan los agregados de tipo cuarcítico respecto de los graníticos (ver Capítulo 4 sección 4.2.1 y 4.2.2) las cantidades de agua utilizadas en cada tipo de hormigón difieren sustancialmente. Sin embargo, bajo la hipótesis planteada, los volúmenes de pasta, resultarían iguales para los hormigones de una misma relación a/c independientemente del tipo y mineralogía del agregado fino y grueso utilizado.

Por otra parte, y con el fin de obtener en los hormigones con agregado cuarcítico de relación a/c 0,55 un nivel de asentamiento similar al propuesto para los hormigones de relación a/c 0,40 se decidió no utilizar aditivo plastificante, y ajustar el asentamiento mediante el empleo de un aditivo superplastificante, hecho que solamente fue necesario realizar en el hormigón patrón como se discutirá más adelante.

Las proporciones de los hormigones, convencionales y reciclados, elaborados con agregados de tipo granítico y cuarcítico se presentan en las Tabla 6.1 y 6.2 respectivamente.

Tabla 6.1. Proporciones de los hormigones con agregado granítico (Kg/m³)

Materiales	Hormigones									
	H4-NG	H4-RG4 S	H4-RG6 S	H4-RG4 H	H4-RG6 H	H6-NG	H6-RG4 S	H6-RG6 S	H6-RG4 H	H6-RG6 H
Agua	152	152	152	162	162	174	174	174	184	185
Cemento	381	381	381	381	381	315	315	315	315	315
AFR	---	246	238	246	238	---	246	238	246	238
AFN	880	610	610	610	610	880	610	610	610	610
AGG	891	891	891	891	891	891	891	891	891	891
Plastif.	2,29	1,14	1,14	1,14	1,14	---	---	---	---	---
Super.	1,14	3,77	2,67	1,91	2,90	---	---	---	---	---
a/c total	0,40	0,40	0,40	0,42	0,42	0,55	0,55	0,55	0,58	0,58
a/c potencial*	0,40	0,37	0,37	0,4	0,4	0,55	0,51	0,5	0,55	0,55

* Considerando que el agregado absorbe el 80% de su capacidad de absorción determinada según IRAM 1520

Tabla 6.2. Proporciones de los hormigones con agregado cuarcítico (Kg/m³)

Materiales	Hormigones									
	H4-NC	H4-RC4 S	H4-RC6 S	H4-RC4 H	H4-RC6 H	H6-NC	H6-RC4 S	H6-RC6 S	H6-RC4 H	H6-RC6 H
Agua	174	171	171	182	184	196	193	193	204	206
Cemento	381	381	381	381	381	315	315	315	315	315
AFR	---	244	238	244	238	---	244	238	244	238
AFN	866	610	610	610	610	866	610	610	610	610
AGC	891	891	891	891	891	891	891	891	891	891
Aditivo plastif.	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	---	---	---	---	---
Aditivo superplastif	2,63	1,91	3,43	1,91	1,91	0,95	---	---	---	---
a/c total	0,46	0,45	0,45	0,48	0,48	0,62	0,61	0,61	0,64	0,65
a/c potencial *	0,40	0,37	0,36	0,40	0,40	0,55	0,51	0,51	0,55	0,55

* Considerando que el agregado absorbe el 80% de su capacidad de absorción determinada según IRAM 1520

6.3 Propiedades en Estado Fresco

6.3.1 Asentamiento

En la Figura 6.1 se informan los asentamientos determinados en los hormigones de razón a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. En dicha figura puede notarse que, en los hormigones elaborados con los agregados RG, se obtuvieron similares niveles de asentamiento que el hormigón de referencia. Para ello debieron utilizarse dosis de aditivo superplastificante (ver Tabla 6.1), aún en los casos en que se

adicionó al agua de mezclado la correspondiente a la absorción de los agregados. En el caso particular del hormigón H4-RG6S la dosis de aditivo superplastificante empleada produjo un nivel de asentamiento por encima del establecido en la dosificación (6 ± 2 cm).

En los hormigones reciclados con agregados cuarcíticos se obtuvo el mismo nivel de asentamiento respecto del patrón (H4-NC) con dosis de aditivo superplastificante 0,2% menores (en peso del cemento), a excepción del H4-RC6S en el cual se utilizó una dosis 0,2% mayor a la utilizada en el hormigón de referencia.

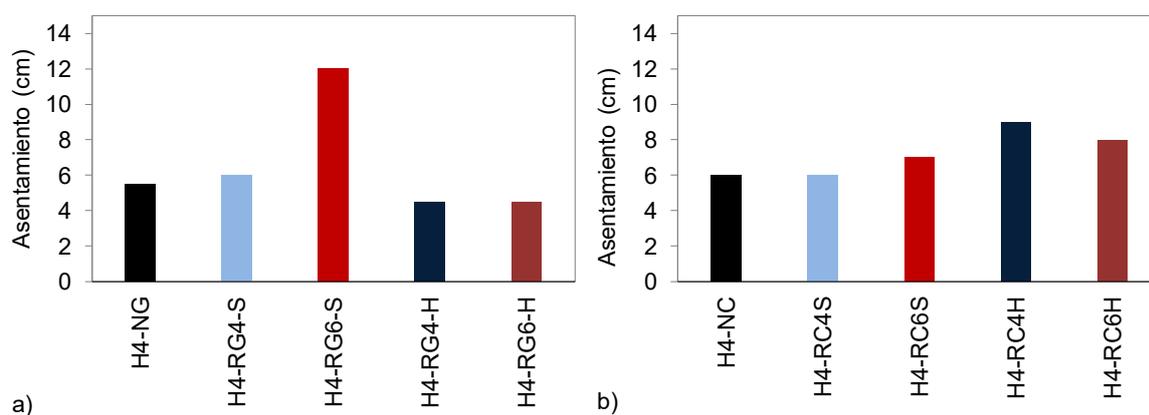


Figura 6.1. Asentamiento de los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Debido al empleo de distintas dosis de aditivo superplastificante, no es posible una comparación directa de la influencia del empleo de AFRs. No obstante, de la necesidad de mayores dosis requeridas en los distintos hormigones (ver Tabla 6.1 y 6.2) se puede inferir que el empleo del agregado RG conduce a aumentos en la consistencia, aun cuando se adiciona al agua de mezclado la cantidad correspondiente a su absorción. Contrariamente, en los hormigones con AFRs cuarcíticos, este comportamiento no fue detectado. En dichos hormigones, con dosis de aditivo reductor de agua similares a la utilizada en el patrón, el asentamiento obtenido fue similar en el caso de las series S y mayor en las series H. Las diferencias mencionadas en cuanto a la influencia de los dos tipos de AFR considerados (granítico y cuarcítico) podrían responder a las diferencias en la forma y textura superficial de cada uno de estos agregados respecto al AFT del mismo origen.

El asentamiento de los hormigones de relación a/c 0,55 se presenta en la Figura 6.2 para los agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Se observa en los hormigones con el AFRG dos comportamientos bien diferenciados. Cuando no se consideró la absorción de los

AFR, los niveles de asentamientos fueron algo inferiores respecto del hormigón de referencia, aunque dentro del mismo rango (± 2 cm). Cuando se compensó la absorción del agregado la consistencia de los hormigones disminuyó significativamente. Otro hecho notorio en los hormigones elaborados con los AFRs graníticos es que los asentamientos fueron levemente superiores en aquellos hormigones en los cuales se emplearon los agregados reciclados provenientes de hormigones de mayor nivel resistente.

En el caso de los hormigones elaborados con el AFRs cuarcíticos fue posible la obtención de un mismo nivel de asentamiento en todos los hormigones. Para ello, sólo en el hormigón de referencia (H6-NC) fue necesaria la utilización de 0,3% (en peso del cemento) de aditivo superplastificante (ver Tabla 6.2).

Respecto de la forma en que se compensó la absorción del agregado, como era de esperar, en aquellos casos en los se consideró la absorción de los mismos, resultaron en una menor consistencia que cuando esta metodología no fue utilizada. En concordancia con la literatura (Leite 2013) este comportamiento podría atribuirse a la mayor cantidad de agua libre como consecuencia de la metodología utilizada para compensar la absorción del AFR.

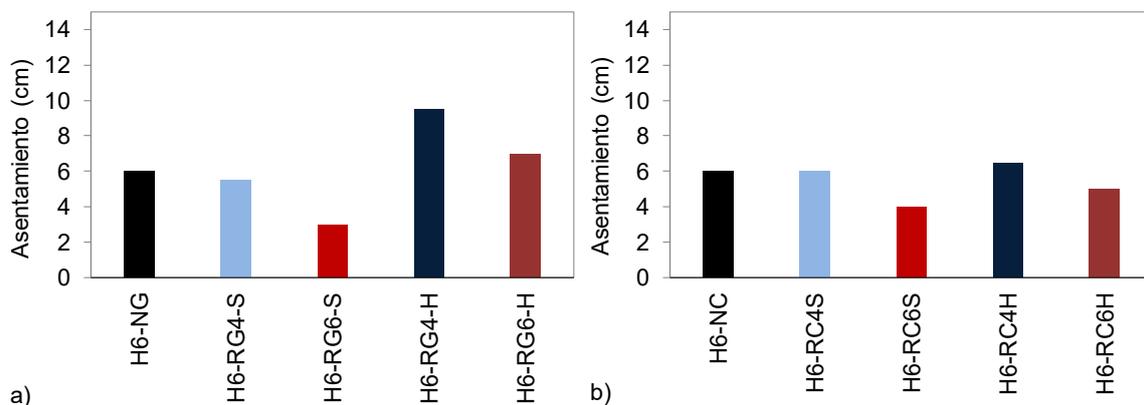


Figura 6.2. Asentamiento de los hormigones de relación a/c 0,55 para los hormigones con agregados a) graníticos y b) cuarcítico

Del análisis integral respecto a la consistencia de los hormigones elaborados pudo observarse que la mineralogía del agregado del hormigón de origen exhibió un desempeño diferenciado frente a la consistencia. En el caso particular de los agregados bajo estudio la influencia relativa de los AFRs de tipo granítico fue mayor sobre la consistencia que la que produjeron los AFRs de tipo cuarcítico.

Otro hecho notorio en los hormigones con el AFR granítico es que los asentamientos fueron levemente superiores o la dosis de aditivo reductor de agua (para lograr la consistencia deseada) fue menor cuando se emplearon los agregados reciclados provenientes de hormigones de mayor nivel resistente (RG4). En los hormigones con agregado cuarcítico este comportamiento fue observado sólo para la relación a/c 0,55. El comportamiento diferencial según el nivel resistente del hormigón de origen podría atribuirse a la menor calidad de la pasta constituyente de los AFRs provenientes del hormigón de relación a/c 0,55 respecto del 0,40, tal como se evidenció en el Capítulo 3. Esta menor calidad de la pasta en términos de su porosidad, influye en la textura superficial. Por lo cual la textura superficial como así también su forma más angulosa podrían ser las responsables del comportamiento observado.

En tal sentido, al igual que lo ocurrido en el caso de los morteros, debido a la influencia de dichas variables pudo observarse que en los hormigones con AFRG no fue posible obtener el mismo nivel de consistencia que en el hormigón patrón a través de la adición al agua de mezclado de la tasa de absorción del AFR planteada. Ello indica que contrariamente a lo indicado en la literatura (Ravindrarajah y Tam 1987, Evangelista y de Brito 2004) parte de las diferencias obtenidas respecto de los hormigones convencionales no deben atribuirse a la mayor absorción de los AFR sino a las diferencias en la forma y textura de las partículas del agregado tal como ha sido sugerido por Leite et al (2013).

Contrariamente a lo indicado en párrafos precedentes, los hormigones con AFRs cuarcíticos, los cuales presentaron una forma más cúbica respecto del AFT de referencia, presentaron una consistencia semejante a la del hormigón de referencia cuando no se compensó la absorción del agregado y una reducción de la misma cuando dicha metodología fue implementada.

La forma y textura de los AFRs parece ejercer una influencia mayor que su absorción. En tal sentido en los morteros con AFRs graníticos aún al compensar la absorción no fue posible la obtención de un mismo nivel consistente en coincidencia con la mayor angularidad que presentaron en comparación con los AFT de referencia. Contrariamente, en los morteros con AFRs cuta angularidad fue similar a la de la AFT de referencia cuarcíticos aun cuando no se compensó la absorción el nivel consistente resultó similar o incluso menor que el correspondiente patrón.

6.3.2 Otras propiedades del estado fresco

En la Tabla 6.3 se presentan los pesos por unidad de volumen (PUV), contenidos de aire incorporado y parámetros de exudación (capacidad, velocidad y coeficiente de determinación R^2) evaluados en los hormigones en estado fresco.

Tabla 6.3. Propiedades en estado fresco

Hormigones	PUV (Kg/m ³)	Aire incorporado (%)	Exudación		
			Capacidad (%)	Velocidad (x 10 ⁻⁶ cm/s)	R ²
H4-NG	2465	2,7	1,97	3	0,95
H4-RG4-S	2423	3,2	0,56	2	0,98
H4-RG6-S	2362	2,7	3,31	9	0,99
H4-RG4-H	2394	3,0	1,32	5	0,98
H4-RG6-H	2423	3,0	1,86	1	0,99
H4-NC	2323	3,5	1,30	10	0,97
H4-RC4S	2323	3,2	1,41	5	0,98
H4-RC6S	2282	3,5	1,50	10	0,98
H4-RC4H	2323	3,2	1,40	20	0,97
H4-RC6H	2323	3,2	1,62	10	0,99
H6-NG	2266	3,5	6,13	20	0,95
H6-RG4-S	2394	2,4	2,76	10	0,99
H6-RG6-S	2394	3,6	3,07	20	1
H6-RG4-H	2371	2,6	4,23	20	0,99
H6-RG6-H	2380	3,2	3,79	20	0,97
H6-NC	2266	3,5	1,98	10	0,99
H6-RC4S	2252	3,3	1,21	20	0,97
H6-RC6S	2281	3,8	1,40	10	0,99
H6-RC4H	2281	3,3	2,29	10	0,96
H6-RC6H	2252	3,5	1,41	10	1,00

En el caso del PUV de los hormigones no pudo establecerse una tendencia clara sobre la influencia del tipo y calidad del AFR utilizado, como así tampoco de la forma en que se consideró la absorción de los mismos. Los hormigones con AFR de un mismo tipo de agregado exhibieron similares o ligeramente inferiores pesos unitarios que sus

correspondientes patrones. No obstante, dichas diferencias fueron menores al 5% para los hormigones con el agregado AFRC y del 3% para el AFRG.

Respecto del contenido de aire incorporado en los distintos hormigones, al igual que lo sucedido en la evaluación del PUV, no se observa una tendencia clara respecto de la influencia del tipo o calidad del AFR. La forma en que se consideró la absorción del agregado para los dos tipos de AFR evaluados tampoco exhibió una tendencia clara. Por otra parte, no se aprecian diferencias significativas en los contenidos de aire de los hormigones reciclados en comparación con los hormigones de referencia (HC y HG).

En cuanto a la exudación de agua, el reglamento CIRSOC 201:2005 fija como límites una velocidad de 100×10^{-6} cm/s y una capacidad del 5%. La limitación en la velocidad de exudación obedece a una mayor probabilidad de formación de canales preferenciales producidos por el agua al ascender hacia la superficie del hormigón. Estos canales, una vez que el hormigón alcanza el estado endurecido traerán consecuencias negativas en las resistencias mecánicas y fundamentalmente en la durabilidad.

En todos los hormigones evaluados se obtuvo una velocidad muy por debajo del límite reglamentario mencionado. A pesar de que en algunos casos la velocidad de exudación de los hormigones elaborados con AFRs duplica a la del hormigón de referencia, los valores obtenidos son de tal magnitud frente al mencionado límite reglamentario, que las diferencias no resultan significativas.

Respecto a la capacidad de exudación, a excepción del hormigón H6-NG, los hormigones se encuentran también por debajo del límite reglamentario (5%). En consecuencia, al igual que en la evaluación del PUV y el contenido de aire, en los hormigones elaborados con AFRs ninguna tendencia clara sobre la exudación de agua pudo establecerse.

De los resultados obtenidos en la evaluación del peso unitario, el contenido de aire y la velocidad y capacidad de exudación de los hormigones bajo estudio surge que no existe una tendencia clara en cuanto a la incidencia de distintas características de los AFR, como son el tipo de AG, la calidad del hormigón de origen y el modo en que la absorción de los AFR fue considerada.

La falta de tendencia de la influencia de dichas variables en las tres propiedades mencionadas, podría indicar que la variabilidad en los parámetros de los ensayos ejerce

una influencia mayor que la utilización de los AFRs. En tal sentido, en todos los casos en que se utilizó AFR en reemplazo del AFT las diferencias obtenidas respecto a los hormigones de referencia resultaron de magnitud irrelevante desde el punto de vista ingenieril.

6.4 Propiedades en Estado Endurecido

6.4.1 Resistencias mecánicas

La resistencia a compresión (f'_c) de todos los hormigones elaborados junto con los desvíos estándar (s) y los coeficientes de variación (CV) se presentan en la Tabla 6.4. Cada valor informado corresponde al promedio de al menos cuatro determinaciones realizadas en probetas cilíndricas de 150 x 300 mm conforme a IRAM 1546.

Tabla 6.4. Resistencia a compresión, desvío estándar y coeficiente de variación de los hormigones estudiados

Hormigón	f'_c (MPa)	s (MPa)	CV (%)	Hormigón	f'_c (MPa)	s (MPa)	CV (%)
Relación a/c 0,40							
H4-NG	45,1	0,5	1,2	H4-NC	36,4	1,8	4,9
H4-RG4S	47,1	0,7	1,5	H4-RC4S	37,5	2,8	7,4
H4-RG6S	34,5	1,8	5,5	H4-RC6S	36,9	1,6	4,2
H4-RG4H	39,1	0,7	1,8	H4-RC4H	34,4	2,6	7,7
H4-RG6H	35,2	1,1	3,2	H4-RC6H	33,4	2,8	8,3
Relación a/c 0,55							
H6-NG	31,8	1,7	5,3	H6-NC	25,9	0,3	1,0
H6-RG4S	33,1	1,6	4,7	H6-RC4S	26,7	1,3	4,9
H6-RG6S	34,5	0,3	0,8	H6-RC6S	25,5	2,1	8,4
H6-RG4H	29,9	1,5	5,1	H6-RC4H	25,8	2,8	11,0
H6-RG6H	31,6	1,4	4,4	H6-RC6H	23,7	2,1	9,0

En la Tabla 6.4 puede observarse que para una misma relación a/c los hormigones patrones elaborados con agregados cuarcíticos presentan niveles resistentes inferiores que aquellos patrones elaborados con agregados graníticos. Este hecho podría obedecer a la menor resistencia de estos agregados respecto a los de origen granítico; a un menor entrecruzamiento mecánico, debido a la forma más cubica de estos últimos, como así también a la mayor cantidad de agua utilizada en los hormigones elaborados con dichos

agregados. Si bien la cantidad de agua adicional que los mismos poseen se corresponde con la hipótesis planteada respecto a que los agregados absorben el 80% de su absorción, no es posible asegurar que tal situación ocurra en la práctica, y por tanto parte de esa agua adicional podría permanecer como agua libre, disminuyendo en consecuencia la resistencia a compresión debido a la mayor relación a/c que se produce. En tal sentido, en la Figura 6.3 se presenta la relación entre la resistencia a compresión de los hormigones con AFRs la relación a/c a) total y b) efectiva. Esta relación se presenta para cada método utilizado para la determinación de la absorción. En todos los casos el cálculo de relación a/c efectiva se realizó considerando que los agregados absorben el 80 % de su capacidad de absorción.

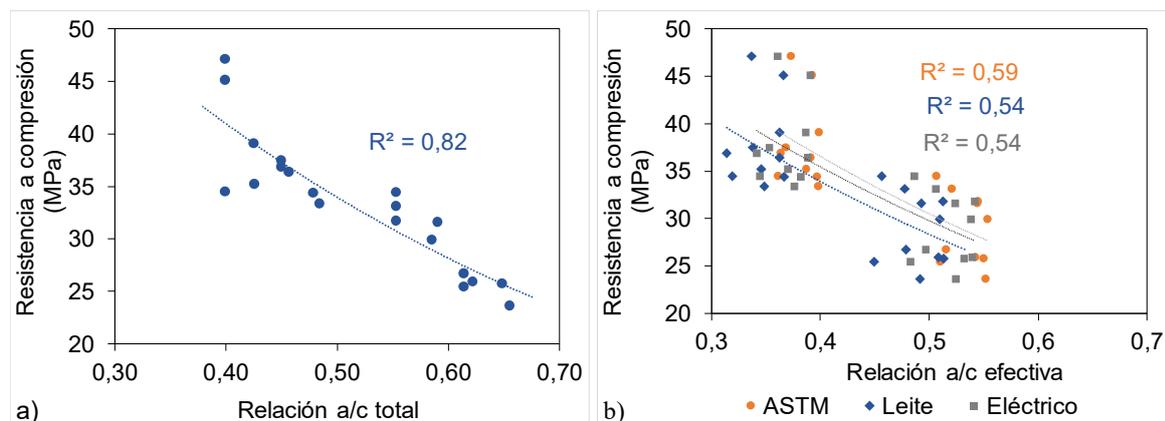


Figura 6.3. Relación entre la resistencia a compresión y la razón a/c a) total y b) efectiva

Puede observarse una clara tendencia a la disminución de la resistencia conforme se incrementa la relación a/c (sea total o efectiva) independientemente del método considerado para la absorción de los AFRs. Puede observarse además que la relación a/c efectiva varía según el método utilizado para determinar la absorción de los AFRs.

Por otra parte, surge de las figuras que en ningún caso se obtuvo un buen ajuste respecto de la relación entre la razón a/c y la resistencia a compresión de los hormigones en los que se emplearon AFRs. No obstante, al analizar la distribución de puntos y el coeficiente de ajuste podría postularse que la relación a/c total resulta en un mejor indicador de la resistencia a compresión que la relación a/c efectiva.

Es posible aseverar entonces, que al compensar la absorción de los AFR parte del agua adicional no será absorbida por el agregado, quedando entonces como agua libre y modificando en consecuencia la relación a/c planteada. Pareciera por tanto una alternativa más eficiente el empleo de aditivos reductores de agua frente a la adición al agua de

mezclado de la tasa de absorción planteada, a fin de evitar modificaciones en el estado fresco y endurecido.

La resistencia a compresión relativa al hormigón patrón se presenta en la Figura 6.4 para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con AFRs a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la misma que en los hormigones elaborados con el AFRG, la resistencia a compresión resultó del mismo orden que el patrón, sólo para los hormigones con el agregado RG4. En aquellos hormigones que se utilizó el agregado RG6 (proveniente del hormigón de menor nivel resistente) la resistencia a compresión fue del orden de 30% y 20% menor en los hormigones H4-RG6S y H4-RG6H respectivamente. Este hecho indica que la resistencia a compresión del hormigón de origen ejerce influencia sobre la resistencia a compresión del hormigón elaborado.

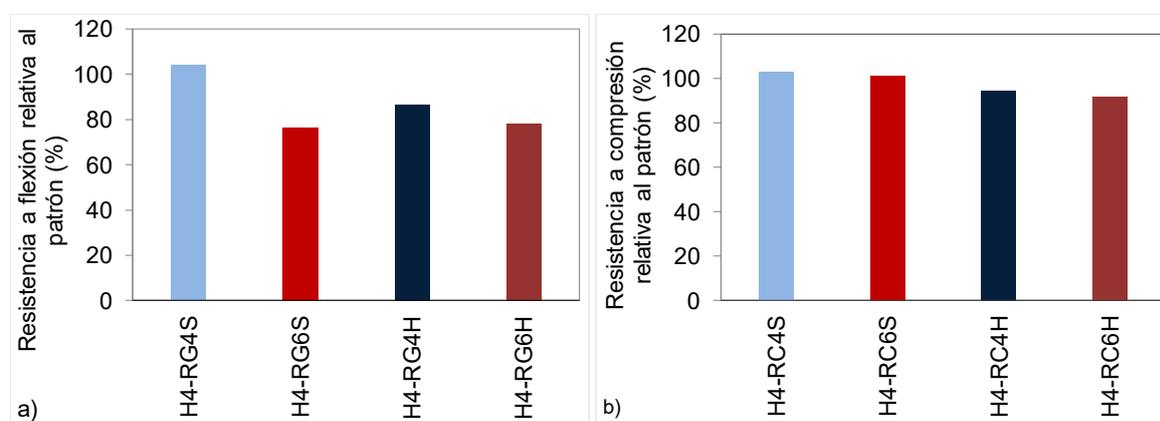


Figura 6.4. Resistencia a compresión relativa al patrón de los hormigones de relación a/c 0,40 con AFRs de tipo a) granítico y b) cuarcítico

Por otra parte, los hormigones elaborados con AFRC se encuentran dentro del mismo nivel resistente ($\pm 15\%$ de acuerdo a IRAM 1546) que su correspondiente hormigón de referencia.

En todos los casos en que se adicionó al agua de mezclado la absorción de los AFRs (series H) la resistencia a compresión resultó menor que en los casos en que dicha metodología no fue utilizada. Este hecho podría deberse, como surge de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la menor relación a/c total de estos últimos hormigones.

Las resistencias a compresión relativas al patrón de los hormigones de relación a/c 0,55 se presentan en la Figura 6.5 para los hormigones con AFRs a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la misma que en los hormigones con AFRG la resistencia a

compresión es ligeramente mayor a la del hormigón de referencia cuando la absorción de los AFR no fue tomada en cuenta (series S), mientras que, al considerarla, la resistencia relativa al patrón fue ligeramente inferior. En ambos casos las diferencias obtenidas se encuentran dentro de la dispersión propia del ensayo con el cual se evalúa tal propiedad ($\pm 15\%$). Por lo tanto, los resultados obtenidos indican sólo una tendencia y no deben considerarse definitivos.

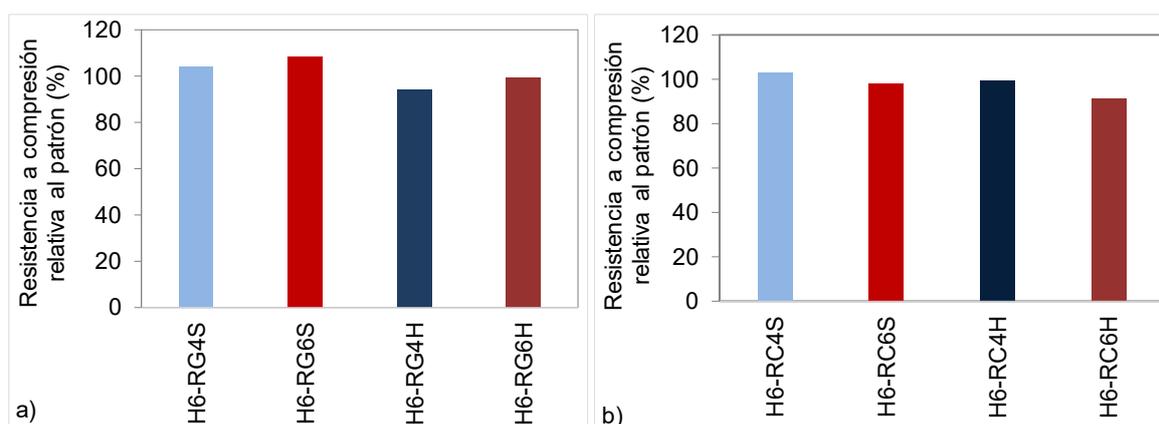


Figura 6.5. Resistencia a compresión relativa al patrón de los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

En el caso de los hormigones elaborados con el agregado AFRC, el comportamiento frente a la compresión difiere en función de la metodología utilizada para considerar la absorción. Las resistencias fueron semejantes a la del patrón para las series S y algo menores para las series H. No obstante, las diferencias obtenidas son menores al 15%. En contraposición a lo ocurrido en los hormigones con los agregados AFRG, la calidad del hormigón de origen resultó en una tendencia directa frente a la resistencia a compresión, presentando los agregados RC4 una mayor resistencia respecto de los RC6.

Del análisis integral del comportamiento en compresión de los hormigones bajo estudio se desprende que la influencia relativa de los AFR depende del nivel resistente del hormigón elaborado. En tal sentido se observó un comportamiento diferenciado según el tipo de AFR considerado.

En el caso de los hormigones con AFRG el nivel resistente del hormigón de procedencia del agregado parece influir de manera inversa en función del nivel resistente del hormigón producido. En los hormigones de relación a/c 0,40 la diferencia en el nivel resistente del hormigón de origen se vio reflejada de manera directa en la resistencia del hormigón producido. Así, para las dos metodologías utilizadas en cuanto a la consideración

de la absorción del AFR se obtuvo una resistencia similar a la del patrón con el agregado RG4, mientras que para los hormigones con el agregado RG6 la resistencia fue significativamente menor. Contrariamente, en los hormigones de relación a/c 0,55, si bien las diferencias obtenidas no resultan significativas, se observó una mayor resistencia en los hormigones con el agregado RG6 respecto del RG4.

Los hormigones con AFR cuarcíticos exhibieron en todos los casos un mismo nivel resistente que el correspondiente hormigón de referencia ($\pm 15\%$). Aun así, pareciera reflejarse una leve tendencia del nivel resistente del hormigón de origen del AFR sobre la resistencia del hormigón producido.

Resulta posible interpretar que en los hormigones de relación a/c 0,55, la absorción de los AFRs puede considerarse como una variable de mayor importancia frente a los de relación a/c 0,40, debido a la mayor cantidad de agua que poseen los primeros. En dicho caso, la absorción de los AFRs contribuirá a una menor porosidad total del hormigón, y consecuentemente provocará mermas en la resistencia de menor magnitud respecto al hormigón patrón.

Podría considerarse, entonces, que la influencia relativa del empleo de los AFRs sobre la resistencia a compresión dependerá del compromiso entre el efecto perjudicial de la menor calidad de estos respecto del AFN y el efecto beneficioso que pudiera tener su mayor absorción en función del nivel resistente del hormigón elaborado.

Una consideración especial merece la forma en que se considera la mayor absorción de los AFRs frente a los AFN. En todos los casos en que se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a la tasa de absorción planteada se observó una disminución en la resistencia respecto a cuándo dicha metodología no fue implementada. Es de esperar entonces que en los casos en que se adicione el 100% de la absorción del AFR al agua de mezclado, dichas diferencias resulten mayores. Pareciera entonces lógico, indicar que la metodología empleada para su consideración deberá ser una variable práctica a fin de establecer una relación técnico-económica que justifique el no empleo de mayores dosis de aditivos reductores de agua para subsanar las mermas en la consistencia en el estado fresco sin perjuicio de la resistencia a compresión en el estado endurecido.

De los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia a compresión surge que al emplear 30% de AFR, la misma no se ve afectada en forma tal que desde el punto de

vista ingenieril invalide el empleo del AFR, independientemente de la mineralogía del agregado, nivel resistente del hormigón de origen y la capacidad de absorción que los mismos presenten.

La resistencia a flexión y el desvío estándar para cada hormigón en estudio se presentan en la Tabla 6.5. Cada resultado informado, es el promedio de al menos tres determinaciones realizadas en vigas de 70 x 100 x 430 mm, de acuerdo a IRAM 1547.

Tabla 6.5. Resistencia a flexión (f_f) y desvío estándar (s) de los hormigones estudiados

Hormigón	f_f (MPa)	s (MPa)	Hormigón	f_f (MPa)	s (MPa)
H4-NG	4,2	0,1	H4-NC	5,2	0,3
H4-RG4S	4,3	0,1	H4-RC4S	5,3	0,2
H4-RG6S	3,1	0,1	H4-RC6S	4,9	0,3
H4-RG4H	3,7	0,1	H4-RC4H	5,1	2,6
H4-RG6H	2,9	0,2	H4-RC6H	4,7	0,2
H6-NG	3,1	1,7	H6-NC	4,5	0,5
H6-RG4S	3,5	0,2	H6-RC4S	4,7	0,2
H6-RG6S	3,3	0,1	H6-RC6S	4,2	0,3
H6-RG4H	3,4	0,2	H6-RC4H	4,3	0,2
H6-RG6H	3,2	0,2	H6-RC6H	4,2	0,3

Surge de la tabla que los hormigones elaborados con el agregado cuarcítico presentan una mayor resistencia a flexión que los elaborados con el agregado granítico. Tales diferencias podrían deberse a una mayor afinidad del agregado cuarcítico con la matriz cementante producto de la similitud en los módulos de éste y la pasta de cemento como así también a la mayor rugosidad superficial de las partículas de este agregado.

En la Figura 6.6 se presenta la relación entre la resistencia a flexión y las relaciones a/c a) total y efectiva (considerando la absorción conforme a IRAM 1520) y en b) la resistencia a flexión y la relación a/c total en función del agregado utilizado. Contrariamente a lo que sucede en el caso de la resistencia a compresión, se observa que no existe una tendencia clara entre la relación a/c total o efectiva y la resistencia a flexión. Este hecho indica que ante esta propiedad otras variables diferentes a la relación a/c poseen una influencia mayor. En tal sentido, en la figura b) se distingue con claridad un comportamiento diferencial entre los hormigones con agregados graníticos y cuarcíticos como así también de la relación a/c total considerada. Los hormigones con agregado cuarcítico exhibieron un comportamiento en flexión similar al del hormigón patrón cuando se utilizó el agregado RC4 y algo más deficiente con la utilización del agregado RC6, independientemente de la

relación a/c. Contrariamente, en los hormigones con agregados graníticos se observa que en los de relación a/c 0,55 la resistencia a flexión fue similar o algo superior que la del hormigón patrón, mientras que para los hormigones de relación a/c 0,40 sólo se obtuvo una resistencia similar para el agregado RG4.

Estas diferencias que se presentan en el comportamiento en flexión de los hormigones sugieren que las propiedades de los AFRs ejercen una influencia mayor que la relación a/c total y potencial en los mismos. En tal sentido, la forma y textura de los agregados podrían mejorar la interfaz pasta-agregado ejerciendo un efecto favorable frente a la resistencia en flexión mientras que la menor resistencia frente a los AFN utilizados ejercería un efecto desfavorable. Por lo tanto, la influencia relativa del empleo de los AFRs en los hormigones podría depender del compromiso entre ambos efectos.

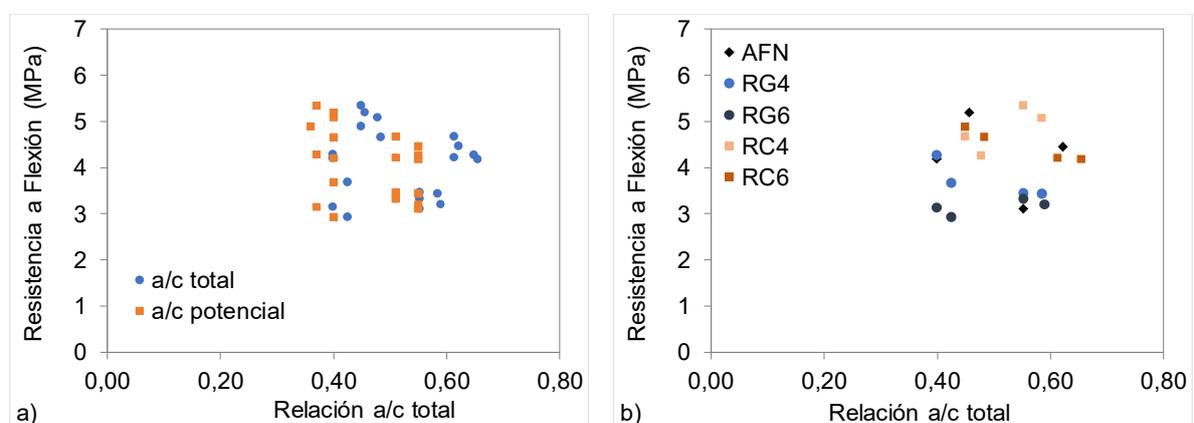


Figura 6.6. Relación entre la resistencia a flexión y la razón a/c a) para todos los morteros b) por tipo de agregado utilizado

La resistencia a flexión relativa al patrón para los hormigones de relación a/c 0,40 se presentan en la Figura 6.7 para los hormigones con AFRs a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la misma que ambos tipos de hormigones reciclados presentan un comportamiento similar frente a las solicitaciones en flexión. En ambos casos se obtuvieron resistencias similares a la del hormigón de referencia sólo en los hormigones elaborados con el agregado proveniente del hormigón de mayor nivel resistente (RG4 y RC4) aun cuando se compensó la absorción del AFR. En tanto que con los agregados RG6 y RC6 la resistencia frente al patrón se vio disminuida.

Por otra parte, la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs presenta una relevancia mayor en los hormigones con AFRG (14 y 7 % para los agregados RG4 y RG6 respectivamente) respecto de los elaborados con AFRC. En estos últimos las

disminuciones en la resistencia frente al hormigón de referencia fueron del orden del 5% para ambas calidades de AFR (RC4 y RC6).

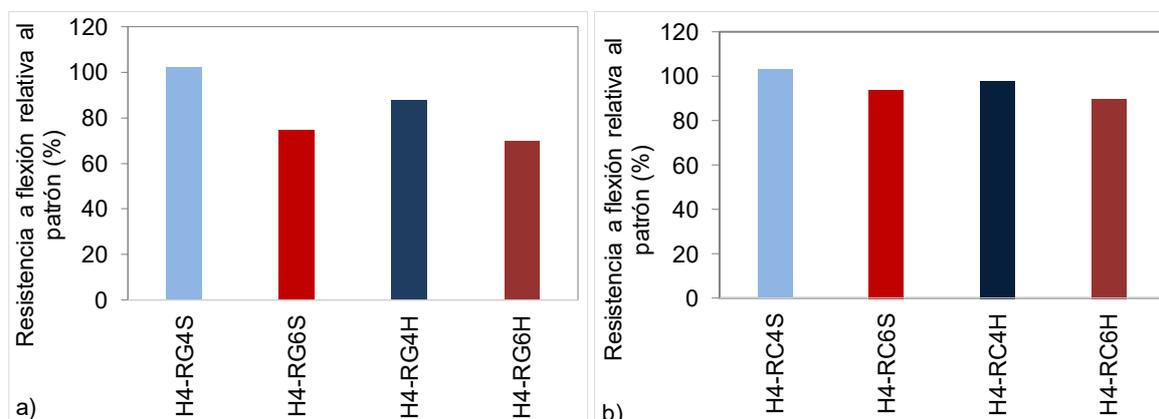


Figura 6.7. Resistencia a flexión relativa al patrón de los hormigones de relación a/c 0,40 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

La Figura 6.8 presenta las resistencias a flexión relativas al hormigón de referencia para los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs a) granítico y b) cuarcíticos. Puede observarse que, en ambos tipos de hormigones, la resistencia a flexión obtenida fue similar a la del correspondiente hormigón patrón, independientemente de la calidad del agregado considerada y la metodología utilizada para considerar la absorción del AFR. Por otra parte, a pesar de que las diferencias obtenidas fueron en un orden de magnitud que no resultó significativo, pareciera existir una tendencia a la disminución de la resistencia en aquellos hormigones en que se utilizó el agregado proveniente del hormigón de origen de menor nivel resistente.

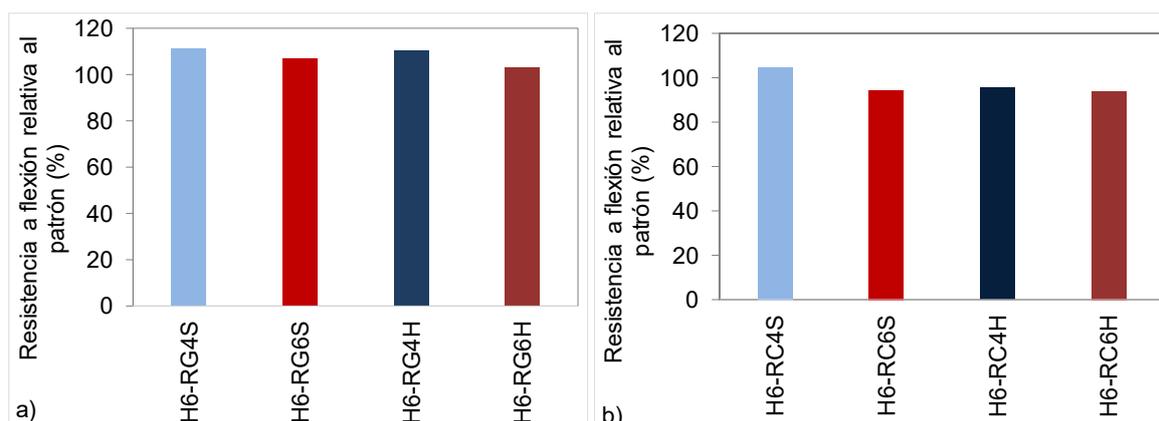


Figura 6.8. Resistencia a flexión relativa al patrón de los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

Del análisis integral en cuanto al comportamiento en flexión de los hormigones con distintos tipos y calidades de agregado reciclado surge que el nivel resistente del hormigón elaborado determina la influencia que el AFR posee sobre tal propiedad. Así, el comportamiento de los hormigones elaborados con AFR puede diferenciarse según la relación a/c empleada. Para los hormigones de relación a/c 0,40 la influencia relativa del AFR resultó significativa particularmente para los morteros elaborados con agregados RG6 y RC6. En contraposición en los hormigones de relación a/c 0,55, el empleo de AFRs no resultó en disminuciones significativas en la resistencia a flexión. Por otra parte, para ambos niveles resistentes se observó una leve tendencia a la disminución en la resistencia conforme el nivel resistente del cual provienen los AFRs disminuyó. La metodología empleada para considerar la absorción resultó significativa en la resistencia a flexión dado que en todos los casos en que se compensó la absorción del agregado la resistencia a flexión fue menor que cuando no fue considerada. No obstante, ninguna tendencia clara sobre la relación a/c total o potencial fue obtenida. Ello implica una influencia mayor de otras variables como pudieran ser la forma y textura de los agregados.

6.4.2 Módulo de elasticidad estático

El módulo de elasticidad estático, junto con el desvío estándar obtenido en los hormigones bajo estudio se presenta en la Tabla 6.6. Cada valor informado corresponde al promedio de al menos tres determinaciones por hormigón. Surge de la tabla que los hormigones con agregado granítico presentan un mayor módulo que aquellos elaborados con agregado cuarcítico. Dichas diferencias deben ser atribuidas al menor módulo de elasticidad de estos últimos agregados frente a los primeros (ver Capítulo 3) y a la menor resistencia obtenida en los hormigones con agregado cuarcítico frente a los graníticos.

Tabla 6.6. Módulo de elasticidad y desvío estándar de los hormigones estudiados

Hormigón	E (GPa)	s (GPa)	Hormigón	E (GPa)	s (GPa)
H4-NG	37,3	0,2	H4-NC	24,0	1,6
H4-RG4S	36,3	0,4	H4-RC4S	25,0	0,9
H4-RG6S	30,3	0,1	H4-RC46S	23,3	1,0
H4-RG4H	35,3	0,2	H4-RC4H	23,3	0,7
H4-RG6H	34,1	0,6	H4-RC6H	21,0	1,4
H6-NG	31,1	0,4	H6-NC	20,4	0,5
H6-RG4S	34,0	0,6	H6-RC4S	18,3	0,5
H6-RG6S	31,2	0,4	H6-RC6S	19,5	0,1
H6-RG4H	30,2	1,3	H6-RC4H	18,9	1,1
H6-RG6H	30,2	0,1	H6-RC6H	19,0	0,7

En la Figura 6.9 se presenta el módulo de elasticidad estático (E) relativo al patrón de los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados reciclados a) graníticos y b) cuarcíticos. Puede observarse que en el caso de los hormigones elaborados con AFRG los módulos obtenidos son del mismo orden que el del hormigón de referencia sólo para el agregado RG4, mientras que para el agregado RG6, se observó una disminución del E del orden del 10 y 15 % para los hormigones H4-RG6H y H4-RG6S respectivamente. Respecto de la calidad del hormigón de origen, se observó que el E tiende a decrecer conforme lo hace el nivel resistente del hormigón del cual se obtuvieron los AFRG. La forma en que se consideró la absorción del AFR parece no influir significativamente sobre el módulo de elasticidad.

En el caso de los hormigones con AFRC a excepción del H4-RC6H se observa un mismo nivel del módulo estático (E), donde las pequeñas diferencias encontradas pueden considerarse dentro de la dispersión propia del ensayo de acuerdo con ASTM C 469 ($\pm 5\%$). Por otra parte, se observa que los hormigones con AFRs provenientes de la trituración del hormigón de mayor nivel resistente (RC4) presentaron un E algo mayor que aquellos en los que se empleó los RC6 provenientes de los hormigones de menor nivel resistente. En cuanto a la metodología utilizada para considerar la absorción de los AFRs se observa que al no considerarla se obtuvo un módulo de elasticidad mayor, que en aquellos casos en donde se optó por la adición al agua de mezclado de la cantidad correspondiente a la tasa de absorción planteada. Las diferencias encontradas en dicho caso fueron del 8 y 10% para los hormigones con agregado RC4 y RC6 respectivamente.

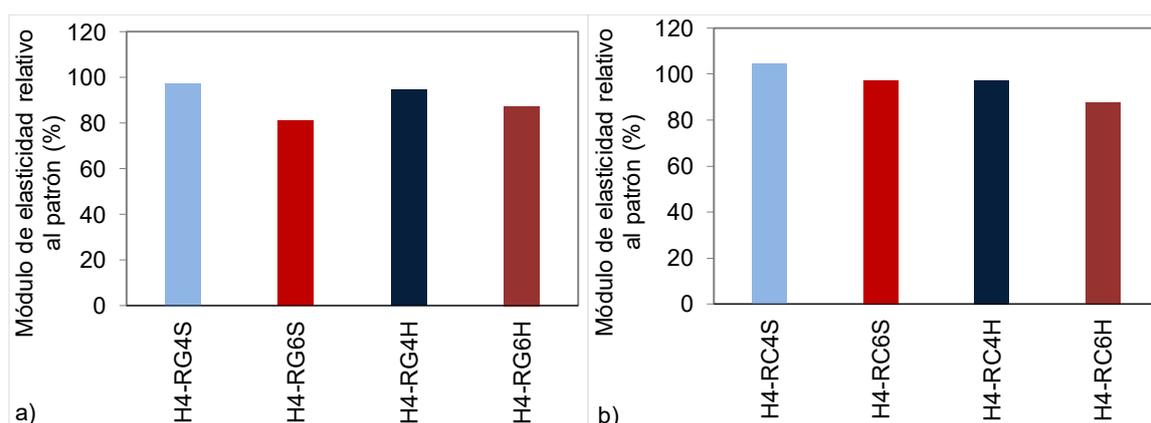


Figura 6.9. Módulo de elasticidad relativos al patrón de los hormigones de relación a/c 0,40 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

El módulo de elasticidad relativo al patrón para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con AFRs a) graníticos b) cuarcíticos se presentan la Figura 6.10. Surge de la

misma que a excepción del hormigón H4-RG4S, los hormigones con AFRG presentan el mismo nivel de E que el obtenido en el hormigón de referencia, siendo las diferencias menores al 3%. Respecto de la influencia de la calidad del hormigón de origen del AFR y la metodología utilizada para considerar la absorción de los AFRs no se observa una tendencia clara entre ambas variables y el módulo estático.

En los hormigones elaborados con el AFRC se observa que en todos los casos el E es menor al determinado en el hormigón de referencia. Las diferencias observadas se encuentran entre el 5 y el 10%, sin una tendencia definida entre las variables bajo estudio y el módulo de elasticidad del hormigón.

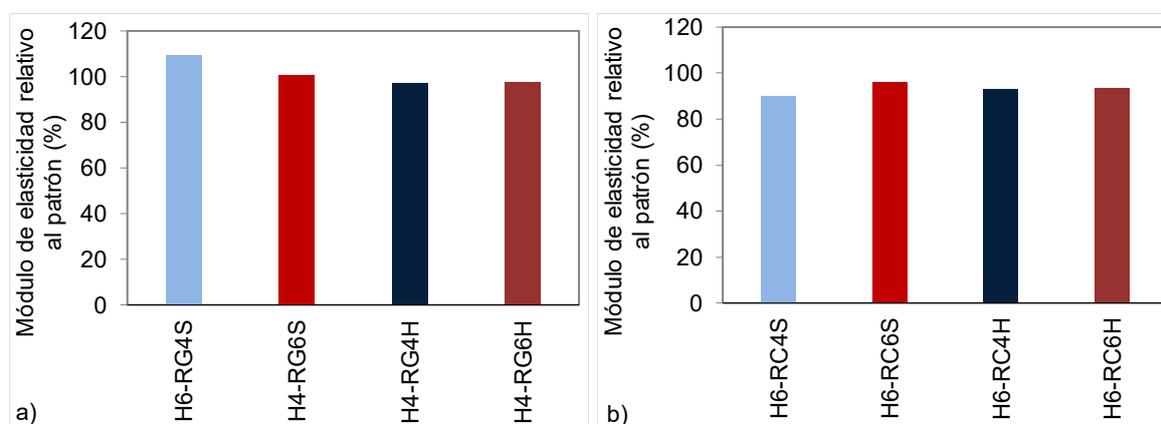


Figura 6.10. Módulo de elasticidad relativos al patrón de los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs de tipo granítico a) y cuarcítico b)

Del análisis del módulo de elasticidad estático obtenido en los hormigones evaluados surge que la influencia del empleo de los AFRs no es independiente del nivel resistente del hormigón producido. En el caso del AFRG la mayor influencia de éstos se produjo en el hormigón de relación a/c 0,40, mientras que en el de relación a/c 0,55 la influencia de su empleo no fue significativa. En los hormigones elaborados con AFRC, el comportamiento resultó inverso al que presentaron los hormigones en los que se emplearon los AFRs graníticos.

6.4.3 Propiedades Durables

6.4.3.1 Densidad, absorción de agua y porosidad

La densidad, absorción de agua y porosidad junto con sus respectivos desvíos estándar (valor entre paréntesis) de todos los hormigones en estudio se presentan en la Tabla 6.7. Las determinaciones se realizaron siguiendo la metodología indicada en la

Norma ASTM C 642, ya que no existe normativa nacional para evaluar dichas propiedades. Cada valor informado surge del promedio de al menos 5 determinaciones. Los especímenes utilizados para evaluar los distintos parámetros, consistieron en cilindros de aproximadamente 100 mm de diámetro y 120 mm de altura.

Tabla 6.7. Densidad (δ), absorción (Abs) y porosidad (P) de los hormigones elaborados

Hormigón	δ	Abs (%)	P (%)	Hormigón	δ	Abs (%)	P (%)
H4-NG	2,37 (0,01)	4,1 (0,10)	9,8 (0,21)	H4-NC	2,21 (0,01)	5,3 (0,15)	11,7 (0,33)
H4-RG4S	2,32 (0,01)	4,4 (0,15)	10,1 (0,31)	H4-RC4S	2,19 (0,011)	5,7 (0,22)	12,4 (0,43)
H4-RG6S	2,30 (0,02)	4,8 (0,25)	11,0 (0,50)	H4-RC6S	2,20 (0,01)	5,8 (0,10)	12,9 (0,21)
H4-RG4H	2,29 (0,01)	4,8 (0,06)	11,1 (0,12)	H4-RC4H	2,18 (0,01)	6,0 (0,13)	13,1 (0,25)
H4-RG6H	2,30 (0,01)	5,2 (0,14)	11,9 (0,20)	H4-RC6H	2,17 (0,01)	6,1 (0,09)	13,3 (0,18)
H6-NG	2,31 (0,01)	5,4 (0,29)	12,5 (0,61)	H6-NC	2,13 (0,03)	7,1 (0,07)	15,3 (0,01)
H6-RG4S	2,36 (0,14)	5,6 (0,10)	13,3 (0,92)	H6-RC4S	2,10 (0,01)	7,5 (0,46)	15,8 (0,01)
H6-RG6S	2,26 (0,01)	5,9 (0,12)	13,4 (0,22)	H6-RC6S	2,10 (0,01)	7,7 (0,47)	16,1 (0,01)
H6-RG4H	2,24 (0,01)	5,7 (0,18)	12,8 (0,39)	H6-RC4H	2,10 (0,01)	7,8 (0,48)	16,4 (0,01)
H6-RG6H	2,26 (0,11)	6,2 (0,18)	14,0 (0,36)	H6-RC6H	2,09 (0,01)	8,0 (0,48)	16,7 (0,01)

Se observa que la densidad de los hormigones de referencia con agregados cuarcíticos resultó menor que la correspondiente a los hormigones elaborados con agregados graníticos, en tanto que la absorción de agua y la porosidad resultaron mayores. Respecto de la densidad no se observan grandes diferencias en los hormigones patrones respecto de los elaborados con AFRs.

Por otra parte, puede notarse que en todos los casos la absorción de agua y la porosidad de los hormigones con AFRs resultaron mayores que sus correspondientes patrones. Para ambos tipos de AFRs considerados (cuarcíticos y graníticos) puede observarse que la absorción de agua y la porosidad presentan un incremento mayor respecto del patrón cuando la relación a/c del hormigón de origen fue 0,55 en comparación con la menor relación a/c (0,40). Otro hecho notorio que surge de la Tabla 6.7 es que al compensar la absorción de los AFRs tanto la absorción como la porosidad se incrementaron respecto a cuando dicha metodología no fue utilizada. Al respecto se observa en la Figura

6.11 que, al igual que en el caso de la resistencia a compresión, la absorción y porosidad dependen de la relación a/c total mientras que no presentan una tendencia clara con la relación a/c potencial (calculada según IRAM 1520).

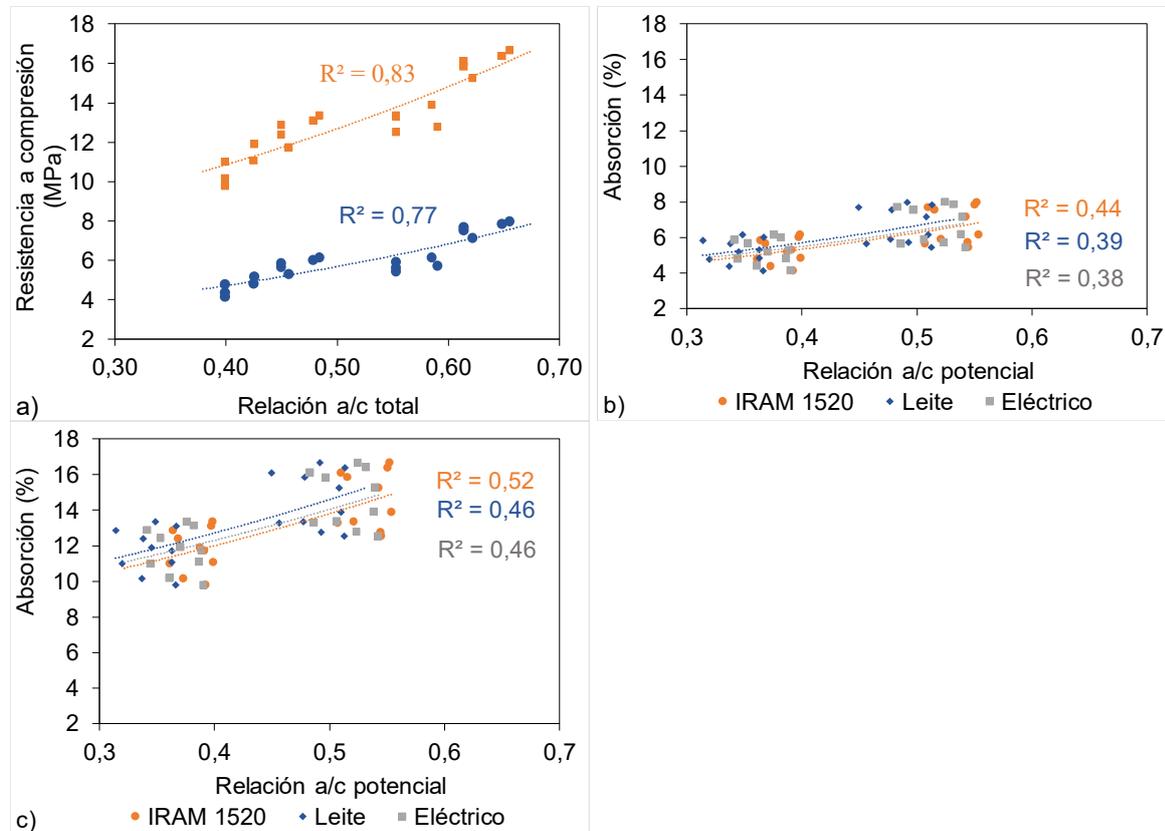


Figura 6.11. Relación entre la absorción de agua y la porosidad respecto de la relación a/c a) total y b-c) potencial

6.4.3.2 Succión Capilar

Como fuera discutido en el Capítulo 2, esta propiedad del hormigón fue incorporada en el Reglamento Argentino CIRSOC 201:2005 como parámetro durable del mismo cuando será emplazado en ambientes agresivos. El valor límite de la succión capilar impuesto en el reglamento es $4 \text{ g/m}^2\text{s}^{1/2}$ para la velocidad de succión, mientras que no se limita la capacidad. En la Tabla 6.8 se presentan los parámetros del ensayo de succión capilar para todos los hormigones evaluados.

Tabla 6.8. Parámetros del ensayo de succión capilar

Hormigón	Velocidad de succión ($\text{g/m}^2\text{s}^{1/2}$)	Capacidad de succión (g/m^2)	Hormigón	Velocidad de succión ($\text{g/m}^2\text{s}^{1/2}$)	Capacidad de succión (g/m^2)	Coefficiente de ajuste
H4-NG	2,3	1342	H4-NC	3,5	3206	0,97
H4-RG4S	2,1	1660	H4-RC4S	3,5	3060	0,97
H4-RG6S	3,9	3613	H4-RC6S	3,1	2855	0,96
H4-RG4H	2,7	2101	H4-RC4H	3,3	3250	0,97
H4-RG6H	4,3	2897	H4-RC6H	3,5	3401	0,96
H6-NG	10,1	4305	H6-NC	11,9	5079	0,98
H6-RG4S	10,1	4413	H6-RC4S	13,3	5320	0,95
H6-RG6S	8,1	4085	H6-RC6S	13,2	5301	0,98
H6-RG4H	10,1	4600	H6-RC4H	15,0	5689	0,98
H6-RG6H	11,4	4879	H6-RC6H	15,4	5723	0,98

Puede observarse que, los hormigones patrones y reciclados elaborados con agregados graníticos presentan menor capacidad y velocidad de succión capilar respecto de los cuarcíticos. Este hecho podría estar relacionado con la menor relación a/c total que presentan estos hormigones, la cual redundaría en una matriz de mejor calidad y consecuentemente en una menor capacidad y velocidad de succión capilar, sumado a la menor porosidad de los agregados graníticos.

Al respecto en la Figura 6.12 se presenta la relación entre la velocidad de succión y la relación a/c a) total y b) efectiva de los hormigones elaborados con AFRs.

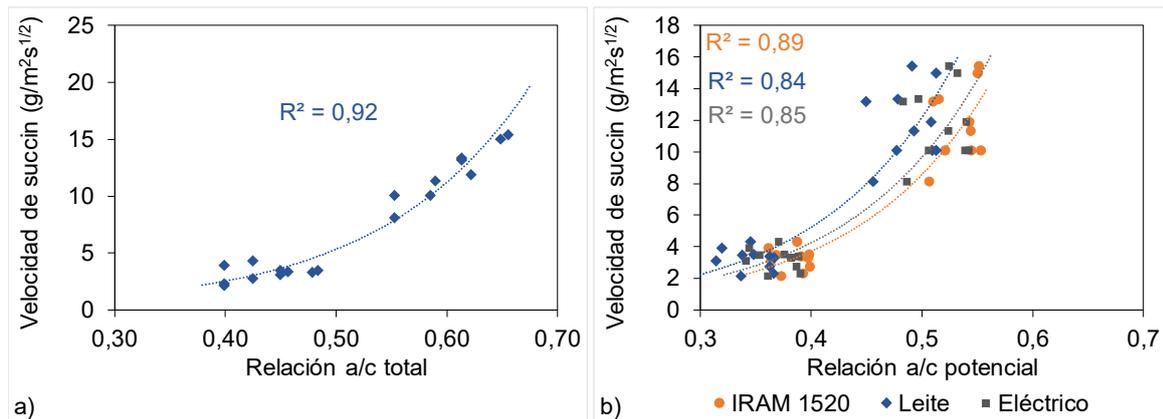


Figura 6.12. Relación velocidad de succión capilar-y la relación a/c a) total y b) potencial

Puede observarse, que independientemente del método considerado para la determinación de la absorción de los AFRs un buen ajuste se obtuvo entre la velocidad de succión y la relación a/c tanto la total como la efectiva. No obstante, al considerar la relación a/c efectiva la distribución de puntos resulta tal que los valores se encuentran nucleados en los extremos. Por tal motivo el buen coeficiente de ajuste obtenido no debe considerarse.

Contrariamente, al considerar la correlación entre la relación la velocidad de succión y la razón a/c total de los hormigones con AFRs se observa que tanto el ajuste como la distribución de puntos indican una tendencia exponencial inversa.

Estos resultados se encuentran en línea con lo concluido respecto a que no toda el agua adicional empleada para compensar la mayor absorción del AFR es absorbida por este. Este hecho conlleva a modificaciones en la relación a/c y consecuentemente en las propiedades del estado fresco y endurecido de los hormigones.

Surge también de la Tabla 6.8 que tanto los hormigones patrones como los reciclados de relación a/c 0,55 presentan valores de velocidad de succión capilar significativamente mayores al establecido en el reglamento para hormigones con requisitos durables. Tal situación podría deberse a que en dichos hormigones no fue posible alcanzar la desconexión de poros, lo cual se ve reflejado claramente en el ensayo de succión capilar. No obstante, debe considerarse que dicha relación a/c no está permitida en el reglamento para ambientes agresivos.

En la Figura 6.13 se presentan las curvas promedio de succión capilar correspondientes a los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Los hormigones con AFR granítico exhiben una capacidad de sustancialmente mayor que la del hormigón de referencia. También se observa un comportamiento diferencial de los AFR en función del nivel resistente del hormigón de origen. Al comparar la capacidad obtenida para cada agregado surge que los hormigones con el RG6 presentan una capacidad de absorción 140% mayor cuando el agua de absorción no fue considerada y un 40% cuando sí lo fue (respecto de los hormigones en los que se empleó el agregado RG4). La forma en que se consideró la absorción de los agregados no presentó una tendencia definida. Para el agregado RG4 se obtuvo una capacidad 30% superior en la serie H frente a la S, mientras que para el agregado RG6 se produjo una merma del 20%.

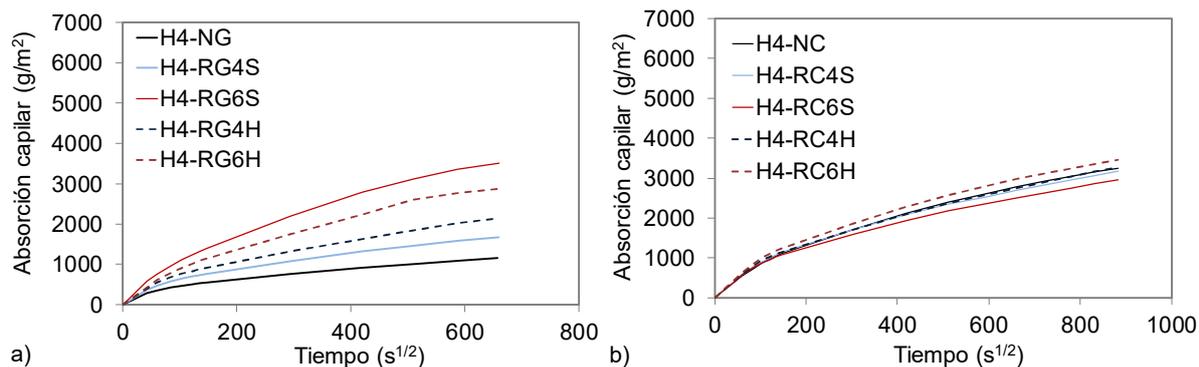


Figura 6.13. Capacidad de succión capilar de los hormigones de relación a/c 0,40 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

Por otra parte, los hormigones con AFRC presentan similares capacidades de succión entre sí y respecto del patrón. En aquellos casos en que la capacidad de succión es mayor que la del hormigón patrón (H4-RC4H y H4-RC6H) las diferencias son menores al 6% mientras que cuando la capacidad fue menor que la del hormigón de referencia (H4-RC4S y H4-RC6S) las diferencias se encuentran por debajo del 10%. En los hormigones con agregados cuarcíticos, en contraposición a lo ocurrido en los hormigones con los agregados graníticos, ninguna tendencia clara respecto de la calidad del agregado surgió de los resultados obtenidos al evaluar la succión capilar.

En la Figura 6.14 se presenta la capacidad de succión capilar para los hormigones de relación a/c 0,55 con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Puede observarse que las diferencias observadas en el caso de los hormigones con agregado granítico de relación a/c 0,40 se redujeron fuertemente siendo las mismas menores al 15% del correspondiente patrón. No obstante, presentan la misma tendencia observada respecto del nivel resistente del hormigón de origen, es decir, los hormigones con el agregado RG4 poseen una capacidad menor que los elaborados con RG6 y del mismo orden que el hormigón patrón.

En tanto que, en los hormigones con agregado cuarcítico se observa una mayor capacidad de succión respecto del patrón. Tales diferencias son del orden del 5% para los hormigones con RC4 y del 12% para el RC6.

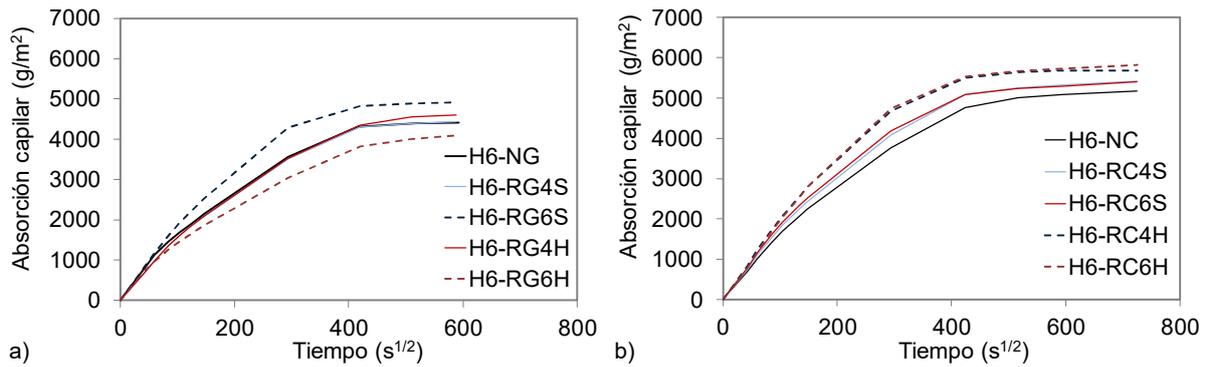


Figura 6.14. Capacidad de succión capilar de los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

La velocidad de succión capilar de los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos se presentan en la Figura 6.15. Puede observarse un comportamiento diferencial según el tipo de agregado considerado.

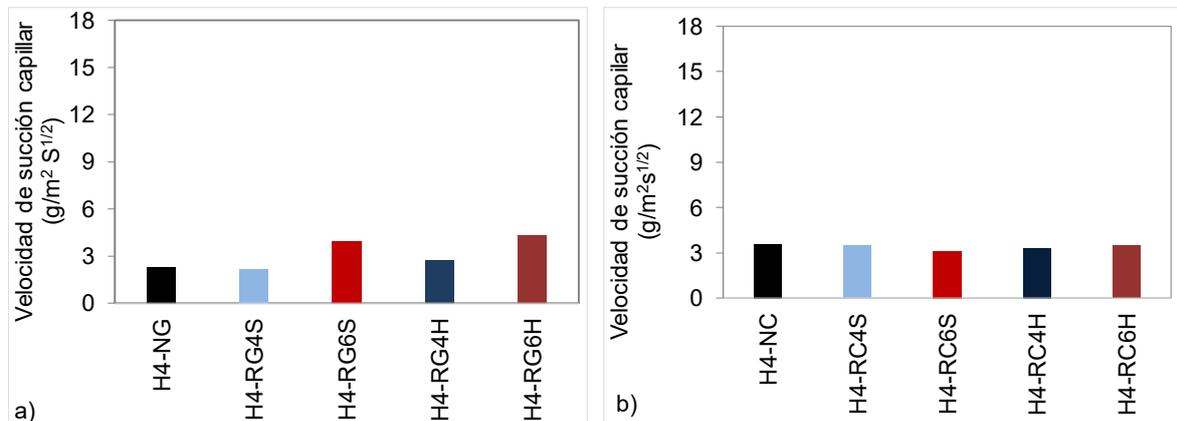


Figura 6.15. Velocidad de succión capilar de los hormigones de relación a/c 0,40 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

En los hormigones elaborados con los AFRs graníticos pueden diferenciarse dos comportamientos bien definidos en función del nivel resistente del cual proviene el AFR. En los hormigones elaborados con el agregado RG4 las velocidades de succión capilar fueron 9% menor cuando no se compensó la absorción del agregado y 17% mayor cuando tal compensación fue realizada respecto del hormigón patrón. Cuando se emplearon los agregados RG6 las velocidades se incrementaron respecto del patrón un 70% y 86% para las series S y H respectivamente. Contrariamente, en los hormigones elaborados con el agregado cuarcítico se observan similares velocidades de succión capilar en todos los hormigones, presentando los hormigones reciclados valores ligeramente menores que el correspondiente patrón.

La velocidad de succión capilar para los hormigones de relación a/c 0,55 con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos se presenta en la Figura 6.16. Puede observarse que, en el caso de los hormigones con agregados graníticos, todos los hormigones exhiben similares velocidades de succión capilar.

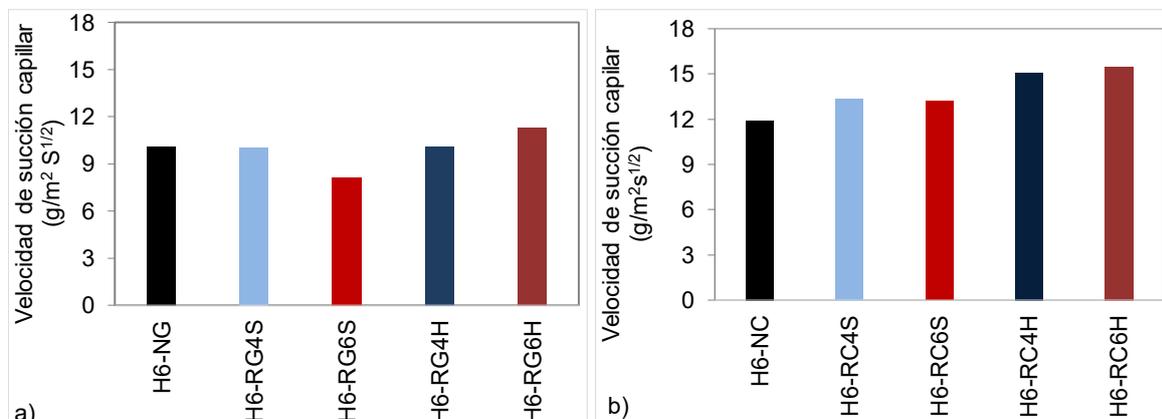


Figura 6.16. Velocidad de succión capilar de los hormigones de relación a/c 0,55 con AFRs de tipo granítico (a) y cuarcítico (b)

En contraposición, en los hormigones con agregado cuarcítico pueden diferenciarse dos niveles en la velocidad de succión. En aquellos casos en que no se compensó la absorción del AFR (series S) la velocidad fue aproximadamente un 10% mayor que la correspondiente al patrón, mientras que cuando la misma fue considerada, la velocidad de succión fue del orden del 25% mayor que la del patrón.

Al analizar el comportamiento frente a la absorción capilar de los hormigones bajo estudio puede observarse que el nivel resistente del hormigón elaborado tiene una significancia mayor que el empleo del AFR, independientemente de su tipología mineralógica y su calidad.

Si bien no se observó en todos los hormigones en que esta metodología fue empleada, es posible aseverar que la influencia relativa del empleo del AFR resultó ser considerable sólo en los casos en que se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente al 80% de su absorción. Tal situación, como se desprende de la Figura 6-17 puede relacionarse con suficiente certeza a la mayor relación a/c total de los hormigones elaborados. Resulta claro entonces que la metodología empleada para considerar la absorción de los agregados, presenta una influencia mayor que el propio uso de estos.

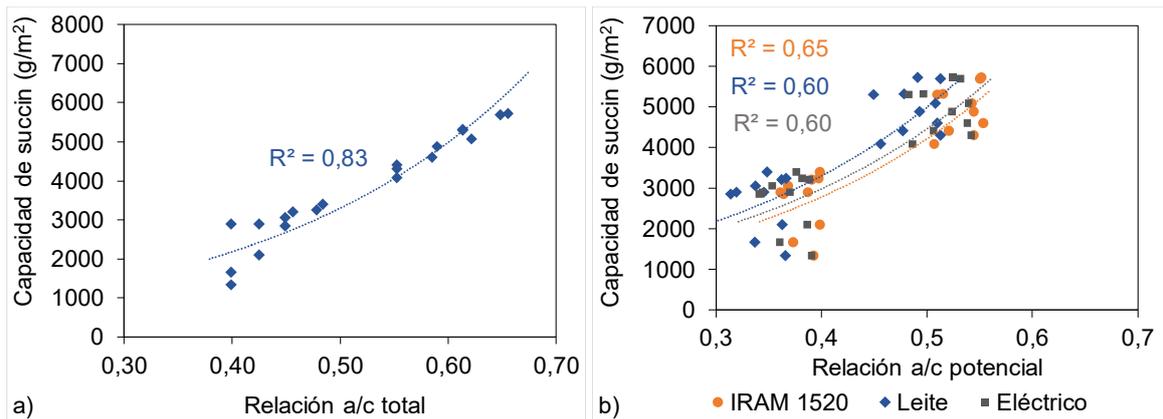


Figura 6-17. Relación entre la capacidad de succión capilar y la razón a/c

Por otra parte, no existe una tendencia definida respecto de la influencia del nivel resistente del hormigón del cual provienen los AFR, como así tampoco del tipo de agregado que contienen.

6.5 Conclusiones

A partir de las dosificaciones planteadas y de los resultados obtenidos en las distintas propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones elaborados puede concluirse que:

- Cuando se empleó el agregado fino reciclado de tipo granítico (RG) se registró un aumento de la consistencia respecto al hormigón patrón, aun cuando se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a una tasa de absorción del 80% de los AFRs. Contrariamente en los hormigones con agregados de tipo cuarcítico (RC) se observó un mayor asentamiento en los elaborados con AFR en comparación con los patrones.
- La influencia relativa del AFR sobre la consistencia en estado fresco de los hormigones exhibió un comportamiento diferencial en función de la relación a/c del hormigón elaborado, siendo mayor en los hormigones de relación a/c 0,40 respecto de los de relación a/c 0,55.
- En los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con el agregado RG fue necesario utilizar mayores dosis de aditivo reductor de agua a fin de lograr un mismo nivel de asentamiento que en el de referencia.
- Cuanto mayor fue el nivel resistente del hormigón de origen del cual provienen los AFRs, menor fue la incidencia del AFR sobre la consistencia de los hormigones elaborados,

a la vez que, al compensar la absorción de agua del agregado, dicha influencia resultó menor, independientemente del nivel resistente del hormigón elaborado.

- La metodología adoptada para compensar la absorción del agregado a través de la adición al agua de mezclado de una tasa del 80% de su absorción, no resultó suficiente para evitar cambios en el estado fresco de los hormigones con AFR en comparación con los hormigones de referencia.
- La forma y textura superficial de las partículas de los AFRs parecen ejercer una influencia relativa mayor sobre la consistencia de los hormigones que la propia absorción del AFR.
- Ninguna tendencia clara pudo establecerse respecto a la influencia del AFR sobre propiedades tales como el contenido de aire incorporado, el PUV y la exudación.
- La resistencia a compresión de los hormigones exhibió una relación inversa con la razón a/c total, mientras que no se correspondió con la potencial. Estos hechos ponen de manifiesto la falta de certeza sobre la tasa de absorción de los agregados en el proceso de mezclado y consecuentemente sobre la relación a/c potencial de los mismos.
- En los hormigones con agregados graníticos se obtuvo un mismo nivel de resistencia en los patrones y reciclados sólo para el agregado RG4 en que no se consideró su absorción. En los restantes casos la resistencia a compresión frente al patrón se vio disminuida entre un 13% y 30%.
- Es posible aseverar entonces, que al compensar la absorción de los AFR parte del agua adicional no será absorbida por el agregado, quedando entonces como agua libre y modificando en consecuencia la relación a/c planteada. Pareciera por tanto una alternativa más eficiente el empleo de aditivos reductores de agua frente a la adición al agua de mezclado de la tasa de absorción planteada, a fin de evitar modificaciones en el estado fresco y endurecido.
- Los hormigones con AFR cuarcítico presentaron similares resistencias que su correspondiente patrón independientemente del nivel resistente del hormigón de origen, la metodología utilizada para considerar su absorción y el nivel resistente del hormigón elaborado. En todos los casos en que se observó disminución de resistencia la misma fue menor al 15% lo cual constituye la dispersión propia del ensayo.

- El nivel resistente del hormigón de origen del cual provienen los AFR no mostró una tendencia definida respecto de su influencia sobre la resistencia a compresión del hormigón elaborado. En todos los hormigones con AFR cuarcítico y en los graníticos de relación a/c 0,40 la resistencia a compresión fue algo menor en los elaborados con los agregados RG6 y RC6 respecto de los RG4 y RC4. No obstante las diferencias de magnitud no permiten establecer una tendencia clara.
- La influencia relativa de los AFR sobre la resistencia a compresión parece depender del nivel resistente del hormigón elaborado. En los hormigones de relación a/c 0,55 en que no se compensó la absorción del AFR se obtuvo una influencia insignificante o beneficiosa del empleo de los AFR, mientras que en los de relación a/c 0,40 el comportamiento fue diferencial en función del tipo de agregado.
- Desde un enfoque ingenieril, el empleo de 30% en volumen de AFR en la elaboración de hormigones, no produce mermas en la resistencia a compresión que impidan su uso, independientemente de su mineralogía, calidad del hormigón de origen y forma en que se considera su absorción.
- La influencia del empleo de los AFRs sobre la resistencia a flexión se ve determinada por el nivel resistente del hormigón elaborado. En los hormigones de relación a/c 0,40 se observaron mermas considerables sólo para el agregado RG6, en tanto que en los de relación 0,55 el empleo de los AFRs no resultó en disminuciones significativas.
- No existe una tendencia clara entre la resistencia a flexión y la relación a/c total y/o potencial. Esto implica la mayor influencia de otras variables inherentes al empleo de AFRs tales como la forma y textura superficial del AFR.
- La influencia del empleo del AFR sobre el módulo de elasticidad estático de los hormigones estudiados depende del nivel resistente y mineralogía del agregado considerada. En el caso de los AFR graníticos se observó una mayor influencia en los hormigones de relación a/c 0,40, mientras que en los de relación 0,55 el empleo de AFRs no resultó en mermas considerables respecto del patrón.
- En los hormigones elaborados con AFR cuarcítico la influencia de su empleo sobre el módulo de elasticidad fue inversa de la observada en los hormigones con agregados granítico. Este comportamiento diferencial en función del tipo de AFR sugiere que la influencia de los AFR sobre el módulo depende del efecto neto que puede generar el menor

módulo de este tipo de agregados y la mejora en la interfaz que pudieran tener asociada a la mayor absorción y a las diferencias en forma y textura respecto de los AFT de referencia.

- No se observó una influencia significativa del empleo de AFRs sobre la densidad de los hormigones. La absorción y porosidad en tanto se vieron incrementadas respecto de los respectivos patrones.
- La relación a/c total resulta tener una influencia mayor que la mineralogía y el nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs sobre la absorción de agua y la porosidad de los hormigones bajo estudio.
- La velocidad y capacidad de succión capilar, al igual que la resistencia a compresión, muestran una relación directa con la relación a/c total y ninguna con la potencial.
- Los hormigones convencionales y reciclados de relación a/c 0,55 presentaron valores de capacidad y velocidad de succión capilar que superan ampliamente los límites reglamentarios. Tal situación debe ser atribuida a la imposibilidad de lograr la desconexión de poros en dichos hormigones.
- La capacidad de succión capilar resultó similar entre sí y con el hormigón de referencia en los hormigones con AFR cuarcítico de razón a/c 0.40 y los de razón 0,55 en que no se compensó la absorción del AFR. Para esta última razón a/c, cuando la absorción del AFR fue considerada se observó un incremento de 12% respecto del patrón.
- En los hormigones con AFR cuarcítico de relación a/c 0.40 la capacidad de succión capilar resultó similar entre sí y con el hormigón de referencia. El mismo comportamiento se observó en los de relación 0,55 en que no se compensó la absorción del AFR. En éstos últimos cuando la absorción fue considerada, se observó un incremento del 12% respecto del patrón.

Capítulo 7

CONTRACCIÓN POR SECADO

7.1 Introducción

Los AFRs poseen en su composición aproximadamente un 30% en peso de pasta de cemento. Consecuentemente los morteros y hormigones elaborados con este tipo de agregados tendrán un contenido total de pasta de cemento mayor en comparación con mezclas elaboradas con agregados finos naturales.

La presencia de la mencionada pasta en la composición de los AFRs implica que el módulo de elasticidad de los AFRs sea menor con relación al respectivo agregado natural. Es bien conocido que el módulo de elasticidad del agregado es una variable de primer orden que incide sobre la contracción por secado. En tal sentido, ha sido demostrado que cuanto mayor es el módulo de elasticidad del agregado, mayor será la restricción que estos imponen, y consecuentemente, menor será la contracción por secado última del hormigón (Neville, 1975, Mehta y Monteiro 1986). No obstante, esta relación es indicada para el agregado grueso, mientras que el rol del módulo de elasticidad del agregado fino sobre la contracción por secado de las mezclas no ha sido fehacientemente determinado. Es posible que ello se deba a la imposibilidad de establecer con certeza el módulo de elasticidad de los agregados finos, o que la incidencia relativa de los mismos respecto de la que produce el agregado grueso sea ínfima.

Sin embargo, es esperable que se produzcan modificaciones en el comportamiento en contracción de los hormigones con AFR en comparación con los elaborados con agregados finos naturales, debido al mayor contenido de pasta anteriormente mencionado, conjuntamente con el menor módulo de elasticidad y el mayor contenido de partículas menores a 75 μm que poseen los AFRs frente a los agregados finos de referencia.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la contracción por secado de los morteros y hormigones elaborados con los agregados finos reciclados bajo estudio. Dichos resultados son comparados con los determinados en morteros y hormigones utilizados como patrones (elaborados con arena de trituración) y con modelos predictivos del fenómeno analizado.

Complementariamente se evalúan las curvas de pérdida de peso de los distintos hormigones, las cuales son un indicio de la pérdida de humedad, hecho que permite una mejor comprensión del proceso de contracción por secado. La presentación de resultados se tratará en forma diferenciada para los morteros y los hormigones elaborados.

7.2 Morteros

7.2.1 Método de ensayo

El análisis de la contracción por secado en morteros se realizó conforme a la Norma IRAM 1597. Con cada mortero elaborado se moldearon 4 probetas de 25 x 25 x 250 mm de longitud.

En la Figura 7.1 se presentan los moldes y pernos utilizados para el ensayo. Los moldes son de acero, de 2,5 mm de espesor, desmontables y perforados en los extremos para permitir el acople de pernos metálicos sujetos desde el exterior, que luego de realizado el desmolde quedan empotrados en la masa del mortero. Dichos pernos poseen forma redondeada para efectuar la medida sobre un único punto mediante un comparador de longitudes de 0,001 pulgadas de sensibilidad.



Figura 7.1. Moldes para contracción de acuerdo a IRAM 1597

Las mediciones del cambio de longitud de las probetas se realizaron a las edades de 3, 7, 28, 56, 90, 120, 180, 270 y 365 días luego del periodo de curado adoptado (28 días), las cuales corresponden a las indicadas en la citada norma. Además, en todos los casos se incorporó una medición adicional a las 24 horas, para permitir un trazado más gradual de las curvas contracción-tiempo. En cada medida el comparador de longitudes se calibra al inicio y al final de las lecturas, con el fin de asegurar la precisión de la medición tomada.

La contracción por secado se calculó según la Ecuación 6.1.

$$\mathcal{E} = \frac{Lx - Li}{Lg} \quad (\text{ec. 6.1})$$

Donde:

ε = Contracción por secado ($\mu\varepsilon$)

Lx = lectura del comparador con la probeta a la edad x menos la lectura del comparador con la barra de referencia a la edad x

Li = Lectura inicial del comparador con la probeta menos la lectura inicial del comparador con la barra de referencia.

Lg = largo nominal de calibración, 250 mm.

7.2.2 Contracción por secado en morteros

En las Figura 7.2 y 7.3 se presentan los valores promedios de contracción junto con los desvíos estándar obtenidos a las edades de 56, 180 y 365 días en los morteros de relación a/c 0,40 y 0,55, respectivamente. Cabe mencionar que la normativa nacional no establece un valor límite para el desvío estándar, como así tampoco una diferencia máxima entre dos muestras de un mismo pastón. En tal sentido, la Norma ASTM C 157 establece un desvío estándar de 4,8% para el promedio de tres probetas de una misma mezcla. Tal valor se presenta a modo de referencia por cuanto el procedimiento de mezclado, los moldes, pernos como así también las medidas de las probetas difieren de la indicada en la Normativa nacional.

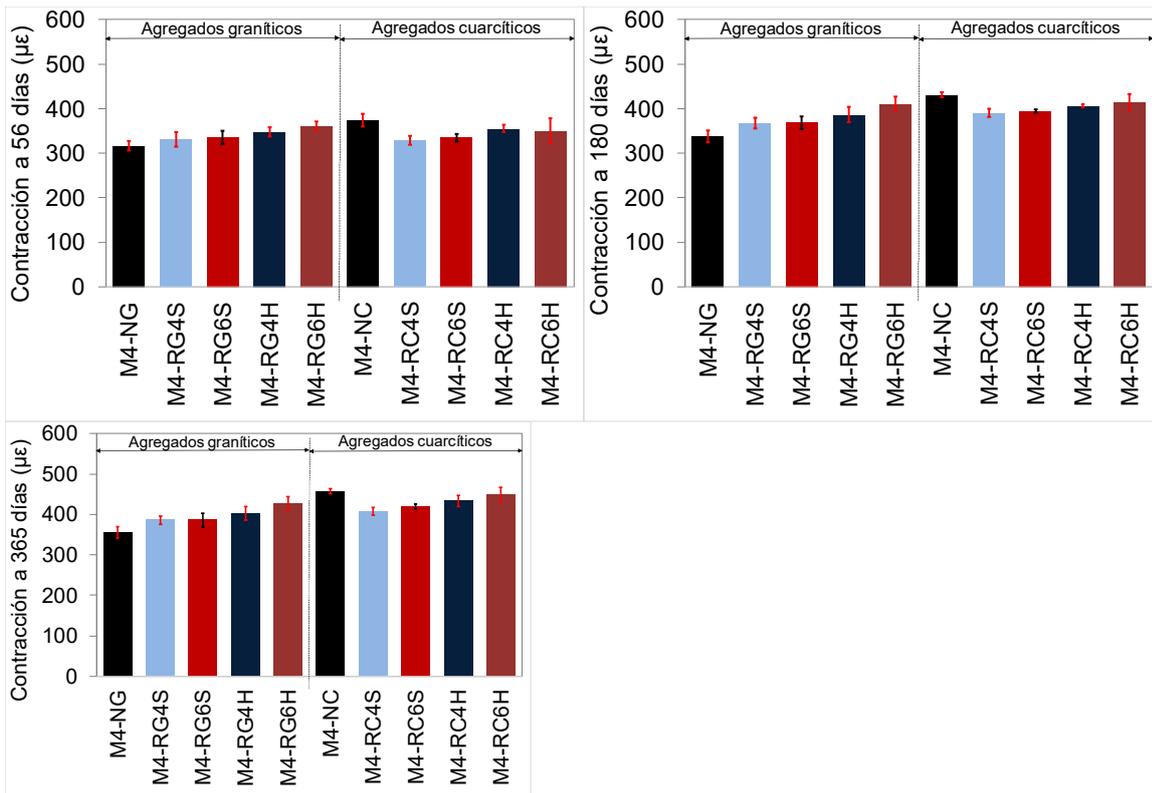


Figura 7.2. Contracción por secado promedio y desvío estándar de los morteros de relación a/c 0,40, a las edades de 56, 180 y 365 días

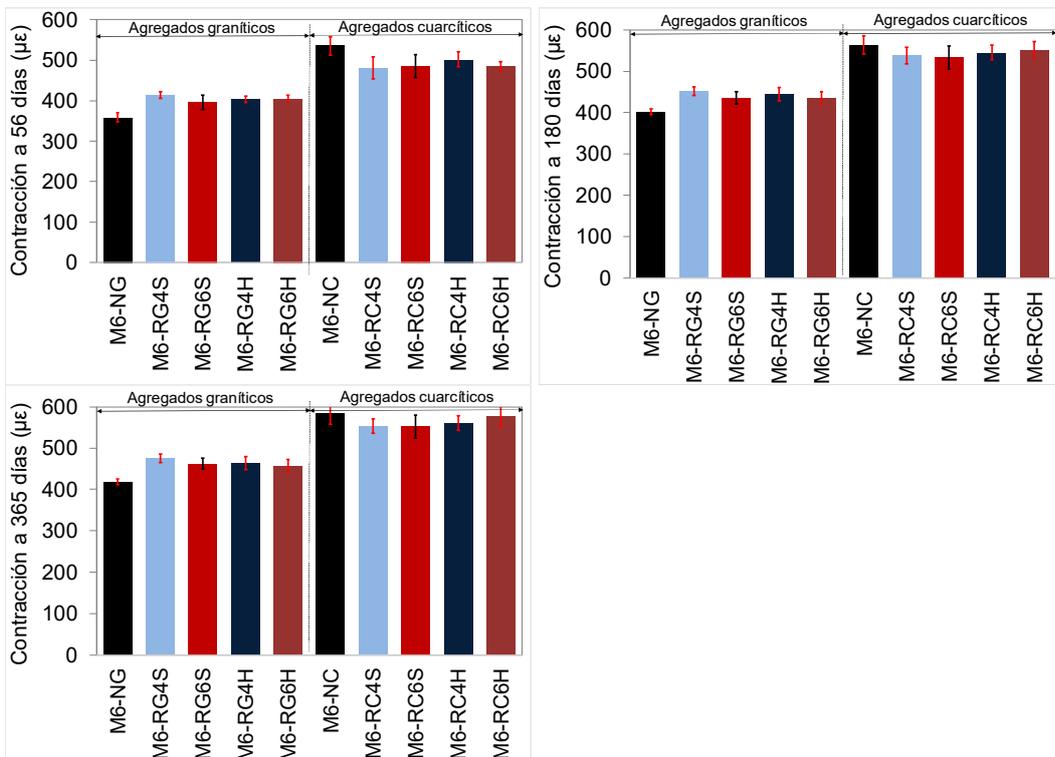


Figura 7.3. Contracción por secado promedio y desvío estándar de los morteros de relación a/c 0,55, a las edades de 56, 180 y 365 días.

Se evidencia en ambas Figuras que los desvíos estándar son en todos los casos de una magnitud insignificante respecto del valor promedio obtenido. Además, tanto en los morteros de relación a/c 0,40 como en los de razón 0,55 los desvíos estándar se encuentran por debajo de los límites establecidos en ASTM C 157.

Por otra parte, el desvío estándar no evidencia una tendencia definida en los morteros reciclados respecto de los patrones. Según la edad evaluada los valores obtenidos en los morteros reciclados se encuentran por encima o por debajo de los correspondientes al mortero de referencia.

Por lo expuesto en párrafos anteriores respecto de la magnitud insignificante de los desvíos estándar y por no encontrarse un comportamiento diferencial en función del tipo de agregado utilizado (natural o reciclado) la presentación de resultados se realizará en adelante en función del valor promedio para cada mortero bajo estudio.

En las Figura 7.4 se presenta la contracción por secado de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos.

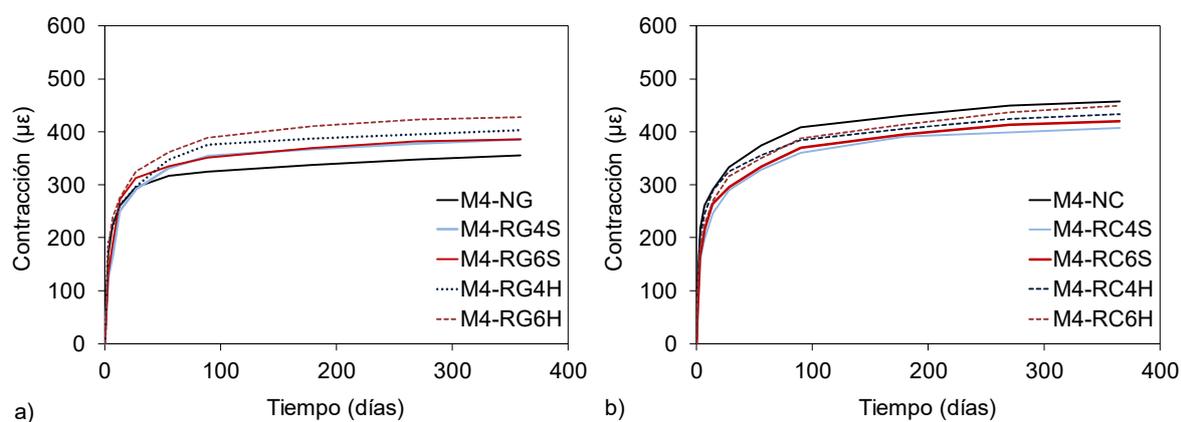


Figura 7.4. Contracción por secado de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Puede observarse que los elaborados con AFRs graníticos presentan una contracción última mayor que la correspondiente al mortero patrón. En tal sentido, se pudo establecer que el incremento fue del orden del 10% cuando no se compensó la absorción de los AFRs y entre un 13 y 20% cuando tal compensación fue realizada.

Contrariamente en los morteros elaborados con AFRs cuarcíticos la contracción resultó entre un 10 y 15% menor que en el mortero de referencia, aun cuando se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción de los AFRs.

El comportamiento diferencial de los morteros según el tipo de agregado considerado podría deberse a una semejanza en los módulos de elasticidad de los AFRs cuarcíticos y su correspondiente AFT natural. En los morteros con agregados graníticos, una mayor diferencia entre los módulos de elasticidad de cada tipo de agregado ocasionaría diferentes niveles de restricción interna con la consiguiente diferencia en los valores de contracción entre los morteros con AFR y con AFT granítico.

Respecto a las variables bajo estudio, puede notarse en todos los casos una menor contracción última de los morteros elaborados con el AFR proveniente del hormigón de mayor nivel resistente (RG4 y RC4), en comparación con aquellos en los que se empleó el AFRs proveniente del hormigón de menor calidad (RG6 y RC6). Sin embargo, las diferencias obtenidas son menores al 5%. En términos prácticos, tomando como referencia el desvío estándar considerado en ASTM C 157, podría establecerse que el nivel de contracción última es similar en todos los morteros reciclados. Consecuentemente, el nivel resistente del hormigón a partir del cual se obtiene el AFR no ejercería una influencia significativa sobre la contracción por secado de los morteros sino una leve tendencia a la disminución en la contracción conforme el nivel resistente del hormigón de origen aumenta.

Contrariamente, la forma en que se consideró la absorción de los AFRs parece influir en la contracción por secado de los morteros. Al respecto, se observa que al considerar la absorción del agregado la contracción a la edad de 365 días se incrementa entre un 5% y 10% respecto de cuando dicha metodología no fue implementada. Es de notar que en ambos tipos de AFRs el incremento del 5% corresponde a los morteros en que se emplearon los AFRs provenientes del hormigón de mayor nivel resistente (RG4 y RC4), mientras que cuando se emplearon los agregados RG6 y RC6 las diferencias fueron del 10%. Podría postularse entonces, que al considerar la absorción del AFR puede hacer que la pobre calidad del AFR cobre mayor importancia

Estos resultados contrastan con lo obtenido en los morteros en que no se compensó la absorción de los AFRs donde se observó un mismo nivel de contracción (diferencias menores al 5%). Tales diferencias podrían deberse entonces a la mayor cantidad de agua neta utilizada cuando se compensa la absorción de los AFRs, la cual al no ser absorbida por los mismos queda como agua libre incrementando la relación a/c.

Por otra parte, otro hecho notable que se aprecia en la Figura 6.4 es que para un mismo nivel resistente del hormigón de origen y una misma forma de considerar la

absorción, los morteros con AFRs presentan un nivel de contracción similar, independientemente la mineralogía del agregado en el hormigón de origen. Ello implica que el tipo de AFRs, al igual que el nivel resistente del hormigón del cual provienen, no presentan una influencia significativa en la contracción por secado, sino que la influencia relativa que los mismos ejercen quedará determinada por las diferencias que presente frente al agregado natural de referencia.

En la Figura 7.5 se presenta la contracción por secado de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos.

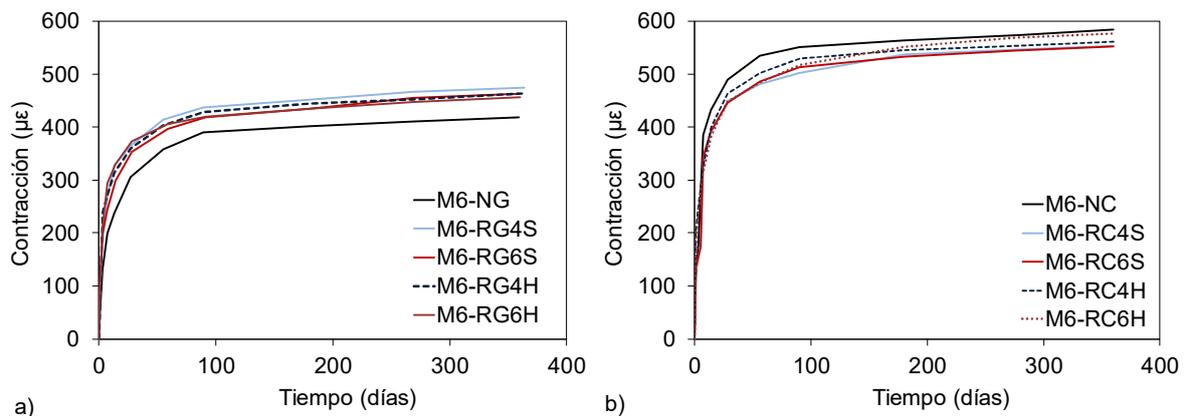


Figura 7.5. Contracción por secado de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Surge de la Figura que en los morteros con AFRs graníticos la contracción fue un 10% mayor que la obtenida en el patrón. El incremento observado en la contracción de los morteros con AFRs resultó independiente del nivel resistente del hormigón de origen y de la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs.

La poca influencia del nivel resistente del hormigón de origen se observó también para los morteros elaborados con AFRs cuarcíticos. Sin embargo, una ligera influencia de la metodología empleada para considerar la absorción de los agregados fue observada. Al respecto cuando no se compensó la absorción de los AFR la contracción fue del orden del 5% menor respecto del patrón. Al adicionar al agua de mezclado el 80% del agua correspondiente a la capacidad de absorción de los AFRs la contracción fue similar a la obtenida en el mortero patrón.

Otro hecho notable observado en la Figura 7.5 es que el nivel resistente del hormigón de origen, como así también la metodología implementada para considerar la

absorción de los AFRs no resultaron ser variables determinantes en la contracción por secado. En todos los morteros con AFRs con un mismo tipo de agregado, los valores de contracción última presentaron diferencias cercanas al 5% independientemente de las variables bajo estudio. Teniendo en cuenta la variación propia del ensayo indicada en ASTM C 157 es factible considerar un mismo nivel de contracción. La escasa influencia del nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs sobre la contracción de los morteros resulta en sintonía con lo hallado en los morteros de relación a/c 0,40. Contrariamente la falta de influencia de la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs exhibió una influencia mayor en los morteros de relación a/c 0,40 respecto de los de razón a/c 0,55. Este hecho podría deberse a que parte del agua utilizada para compensar la absorción de los agregados no es absorbida por los mismos, quedando como agua remanente y originando una mayor porosidad de la pasta. Esta menor calidad de la pasta resultaría más notoria en los morteros de relación a/c 0,40 que en aquellos de razón a/c 0,55 por cuanto la calidad de la pasta es menor en estos últimos morteros y la cantidad de agua adicional no generaría mayores diferencias.

Por otra parte, se observan diferencias en los niveles de contracción de los morteros con AFRs según la mineralogía del agregado natural en el hormigón que les da origen. Así, los morteros de relación a/c 0,55 con AFRs cuarcíticos presentan una contracción entre un 15% y 20% mayor que los graníticos. Estas diferencias no se observaron en los morteros de relación a/c 0,40, lo cual podría indicar que la influencia relativa del tipo de AFR no resulta independiente de la relación a/c de los morteros elaborados, cobrando mayor importancia al incrementarse la misma.

Se han analizado hasta el momento las diferencias obtenidas en la contracción última de los morteros. Con el fin de realizar un análisis comparativo integral a todas las edades, en la Figura 7.6 se presenta la contracción de los morteros reciclados relativa a la del mortero patrón, para las relaciones a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55, elaborados con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarcíticos. Puede observarse que hasta la edad de 56 días todos los morteros presentan un comportamiento errático, con picos por encima y por debajo de la contracción obtenida en el patrón (100%). Dicho comportamiento podría indicar un cambio en el mecanismo de la contracción en las primeras edades asociado a la forma en que se transfiere el agua desde la masa del mortero al ambiente. Un análisis más profundo al respecto podrá realizarse al evaluar la contracción en función de la pérdida de peso de las muestras.

Luego de los primeros 56 días desde el fin del curado todos los morteros presentan una pendiente prácticamente nula. Ello implica que la contracción en el patrón y en los morteros reciclados se incrementa en similar magnitud.

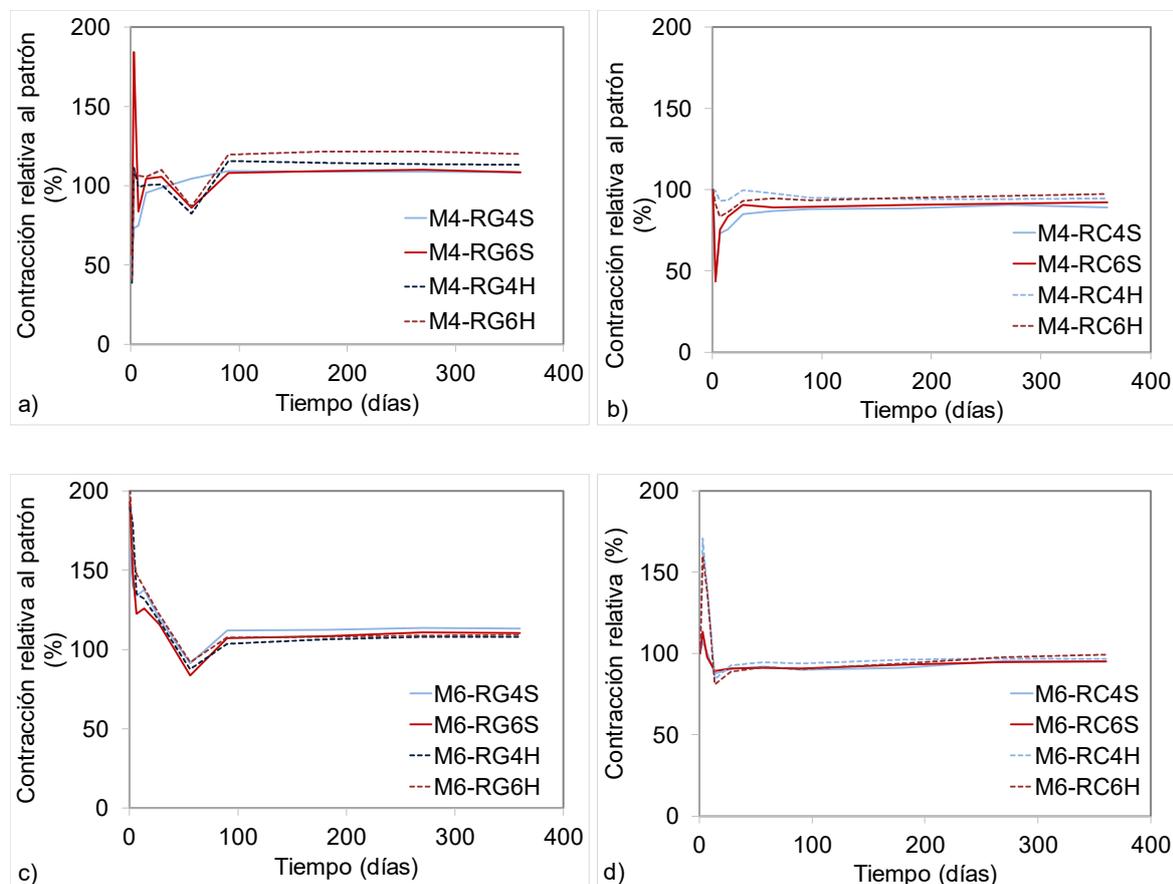


Figura 7.6. Contracción por secado relativa al mortero patrón de los morteros de relación a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55

Dadas las modificaciones señaladas en la contracción por secado de los morteros reciclados con referencia a los patrones, sería útil poder estimar la contracción de los primeros a partir de los valores obtenidos en mezclas con agregados naturales y afectarlos por algún coeficiente. Este caso es el que plantea RILEM para el caso de hormigones con AGR.

RILEM (1994) establece coeficientes de corrección para estimar la contracción de hormigones reciclados a partir de la contracción de un hormigón patrón. Dichos coeficientes resultan función de la calidad del agregado reciclado y contemplan sólo el uso del agregado grueso reciclado (AGR), tomando el valor de 1,5 cuando los AGR provienen de la trituración de hormigones.

Resulta entonces de interés práctico relacionar la contracción de los morteros reciclados con la del mortero patrón y obtener una recta de ajuste, la cual, si la correlación resulta buena, podría utilizarse como un índice de corrección respecto de la contracción en el patrón (Sánchez de Juan 2005). Este índice además contemplaría la recta de manera integral en lugar de la contracción última. Consecuentemente, la pendiente de la recta de ajuste podría emplearse para estimar la contracción de los morteros reciclados a partir de la del mortero patrón, considerando para ello una misma dosificación.

En tal sentido, si la pendiente de dicha recta es igual a 1 la contracción resulta igual entre morteros patrones y reciclados. Una pendiente mayor a la unidad indica que la contracción esperable en los morteros reciclados es mayor que en el patrón y por el contrario una pendiente menor a dicho valor indicaría que la contracción es mayor en el mortero patrón.

En la Figura 7.7 se presenta la relación entre las contracciones de los morteros patrones y reciclados de relación a/c a-c) 0,40 y b-d) 0,55, elaborados con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarcíticos. Se puede observar en todos los casos que los valores de contracción se ajustan según una regresión lineal, con un buen nivel de ajuste ($R^2 > 0,93$).

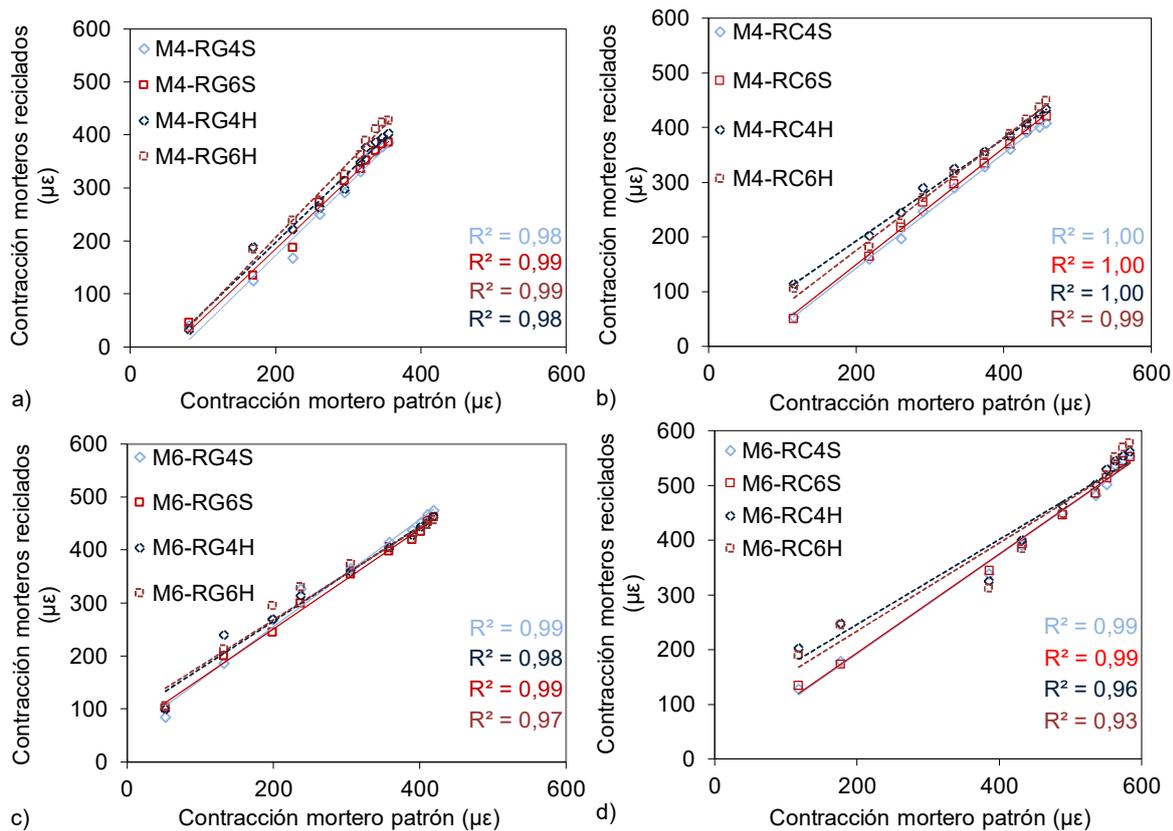


Figura 7.7. Relación entre la contracción por secado del mortero patrón y los morteros reciclados

En la Tabla 7.1 se presentan las ecuaciones de las rectas de ajuste correspondientes a cada uno de los morteros en estudio. Puede distinguirse con claridad que los coeficientes de las ecuaciones de regresión que definen la pendiente de la recta de ajuste presentan diferencias apreciables en función del tipo de agregado considerado y la relación a/c de los morteros elaborados. En tal sentido, cuando se emplearon AFRs graníticos, dicho coeficiente en los morteros de relación a/c 0,40 toma valores entre 1,17 y 1,27, lo que indica una considerablemente mayor contracción en los morteros reciclados. Contrariamente, para el mismo tipo de agregado, los morteros de relación a/c 0,55 presentan un coeficiente cercano a la unidad (entre 0,98 y 1,07), pudiendo interpretarse entonces que la contracción en los morteros reciclados resulta similar a la obtenida en el mortero patrón.

En el caso de los morteros elaborados con agregados cuarcíticos, el coeficiente de la recta de ajuste resulta entre 0,93 y 1,07 para la relación a/c 0,40 y entre 0,77 y 0,90 para la relación a/c 0,55. Dichos coeficientes indican, en el primer caso una contracción de los

morteros reciclados similar o levemente inferior a la del mortero patrón, y en el segundo caso una contracción claramente menor en los reciclados.

Tabla 7.1. Ecuaciones de la recta de ajuste de la relación entre la contracción del mortero patrón y los morteros reciclados

Mortero con AFR granítico	Ecuación de ajuste	Mortero con AFR cuarcítico	Ecuación de ajuste
M4-RG4S	$y = 1,17x - 44,27$	M4-RC4S	$y = 1,04x - 67,08$
M4-RG6S	$y = 1,17x - 35,80$	M4-RC6S	$y = 1,07x - 64,54$
M4-RG4H	$y = 1,19x - 30,90$	M4-RC4H	$y = 0,93x + 6,55$
M4-RG6H	$y = 1,27x - 35,62$	M4-RC6H	$y = 1,02x - 30,16$
M6-RG4S	$y = 1,07x + 32,20$	M6-RC4S	$y = 0,90x + 10,67$
M6-RG6S	$y = 1,01x + 37,90$	M6-RC6S	$y = 0,90x + 13,30$
M6-RG4H	$y = 0,99x + 52,02$	M6-RC4H	$y = 0,77x + 91,11$
M6-RG6H	$y = 0,98x + 56,25$	M6-RC6H	$y = 0,80x + 73,03$

Es de notar que los coeficientes observados no reflejan con exactitud lo obtenido al evaluar la contracción última de los morteros reciclados frente a la del patrón. Sin embargo, si los mismos son entendidos como una estimación integral de la contracción por secado a las distintas edades de evaluación, en términos generales, las pendientes obtenidas muestran las mismas tendencias señaladas respecto de la contracción por secado. En tal sentido, en función de los coeficientes obtenidos, puede establecerse que el empleo de AFRs en los morteros de relación a/c 0,40 supone un mayor nivel de contracción cuando se emplearon agregados graníticos. Contrariamente, en los morteros con agregados cuarcíticos de relación a/c 0,55, el empleo de los AFRs resulta en una menor contracción por secado con relación al mortero patrón o de referencia.

Del análisis de los coeficientes surge también que en los morteros de relación a/c 0,55, la influencia relativa de los AFRs sobre la contracción por secado es menor que la que se produce en los morteros de relación a/c 0,40, para ambos tipos de agregados utilizados.

Además, el tipo de agregado natural considerado establece una diferencia clara frente a la contracción por secado de los morteros, dado que los coeficientes obtenidos para

ambas relaciones a/c en los morteros con AFRs cuarcíticos son menores que los correspondientes en los morteros con agregados graníticos.

7.2.3 Pérdida de agua en los morteros

Como fuera discutido en el Capítulo 2, la contracción por secado está íntimamente relacionada con la pérdida de agua (Bazant et al 1972 a y b, Neville 1975, Ba 2013). Un indicador de esta última es la pérdida de peso en las muestras. Por tal motivo, en la Figura 7.8 a-d) se presenta la pérdida de peso de los morteros bajo estudio. Se observa en todos los casos que los morteros elaborados con AFRs presentan una mayor pérdida de peso que sus correspondientes patrones, incluso en los casos en que no se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción de dichos agregados.

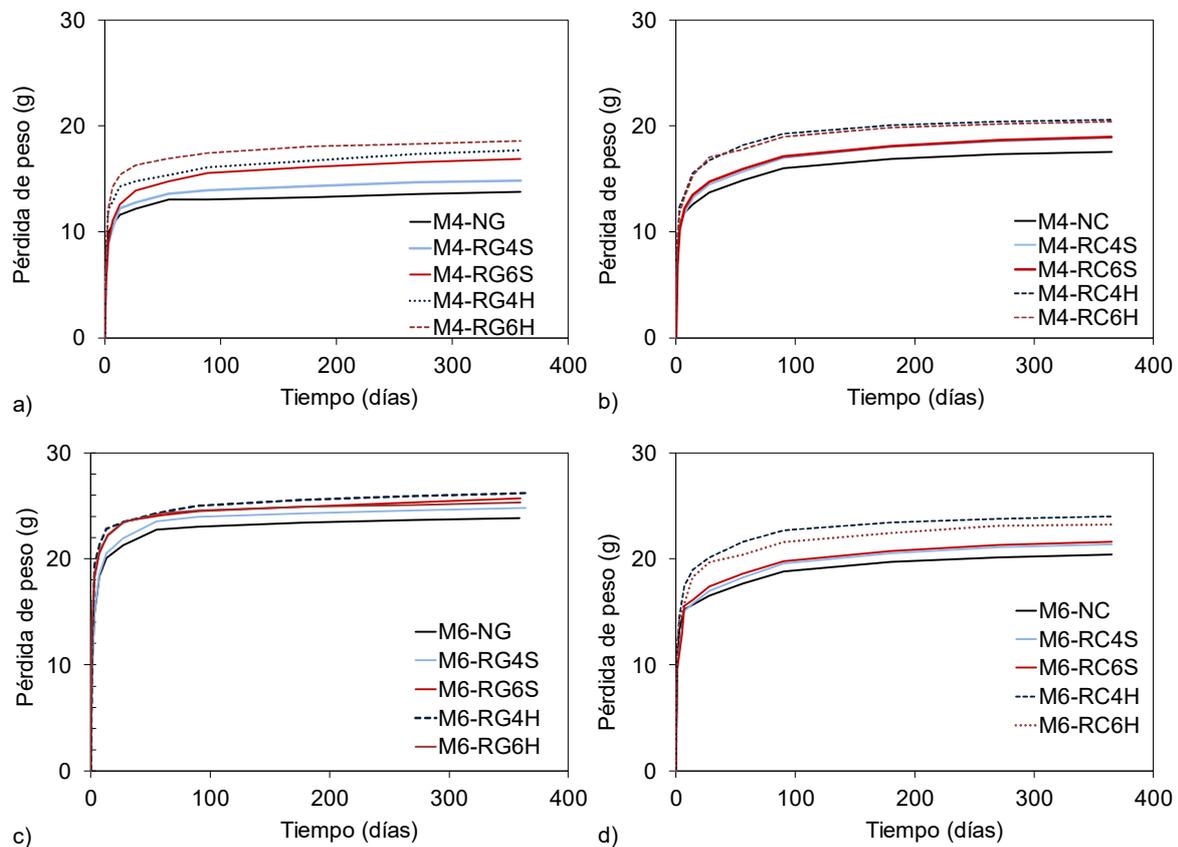


Figura 7.8. Pérdida de peso en el tiempo de los morteros en estudio

Cabe mencionar que la cantidad de agua total empleada en la elaboración de los morteros patrones es igual (en los morteros con granito) e incluso mayor (en los morteros con cuarcita) que la utilizada en los correspondientes morteros reciclados en los que no se compensó la absorción del AFR (ver Tabla 5.1, Capítulo 5)

Por los motivos expuestos, la mayor pérdida de peso observada en dichos morteros reciclados implica necesariamente una mayor cantidad de agua en su interior que los correspondientes morteros patrones. Ello podría deberse a una mayor porosidad de los mismos frente al mortero de referencia o a la retención de agua en los poros del agregado en coincidencia con lo sugerido por Lima y Leite (2012).

Por otra parte, otro hecho notorio en las Figura 7.8 es que la pérdida de peso es algo mayor en los morteros con AFRs provenientes de hormigones con menor nivel resistente (RG6 y RC6), en comparación con los morteros elaborados con los agregados RG4 y RC4. Este comportamiento se observa tanto para cuando el agua de absorción fue compensada como en aquellos en los cuales no fue considerada. En los morteros en los que se adicionó el agua de absorción, el comportamiento podría atribuirse a que, como fuera discutido en capítulos precedentes, parte del agua adicionada no fuera absorbida por los AFRs y consecuentemente dichos morteros tendrían una porosidad mayor. Sin embargo, en los morteros en que no se compensó la absorción de los AFRs el agua de mezclado utilizada coincide para ambas calidades del hormigón de origen evaluadas. Por lo tanto, la mayor pérdida de agua se encuentra en línea con la mayor absorción de los agregados RG6 y RC6 respecto de los RG4 y RC4, y consecuentemente la explicación a este fenómeno podría ser la retención de agua por parte de los AFRs.

Puesto que los morteros fueron curados mediante sumersión en agua saturada con hidróxido de calcio, resulta pertinente considerar que al finalizar el curado todas las muestras se encontraban saturadas. En base a ello, y con el fin de verificar si la mayor pérdida de peso se debe a una mayor porosidad de los morteros con AFRs, se presenta en la Figura 7.9 la relación entre dichas variables, en función del tipo de agregado natural utilizado.

Puede observarse que, con un buen ajuste ($R^2 > 0,90$), la pérdida de peso se incrementa proporcionalmente al incremento de la porosidad en los morteros en los que se emplearon agregados graníticos. En el caso de los morteros con agregados cuarcíticos, si bien el nivel de correlación obtenido no resulta bueno ($R^2 = 0,76$), se observa también la tendencia anteriormente mencionada.

Cabe mencionar que, si bien el ajuste obtenido en el caso de los morteros graníticos resulta bueno, la distribución de puntos es tal que los morteros de relación a/c 0,55 se encuentran nucleados en los extremos. Por lo tanto, el ajuste obtenido no debe

considerarse como un indicador inequívoco de la proporcionalidad entre la porosidad y la pérdida de peso. Estas consideraciones sumadas a la falta de una buena correlación en los morteros cuarcíticos podrían entenderse como indicadores de que parte del agua que se pierde en los morteros se encuentra dentro de los poros de los AFRs.

Por otra parte, resulta evidente que la pendiente de la recta de ajuste resultó mucho más pronunciada en los morteros con agregados graníticos. Estas diferencias podrían asociarse con los diferentes agregados silíceos utilizados en cada caso.

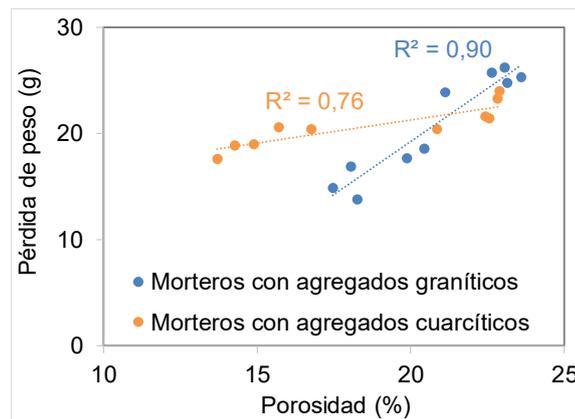


Figura 7.9. Relación entre la pérdida de peso y la porosidad

Las curvas pérdida de peso en función del tiempo mostraron que los morteros elaborados con AFRs pierden un mayor contenido de agua que sus correspondientes patrones, aún con un menor contenido de agua total. Conforme a ello, la contracción por secado debería ser mayor. Sin embargo, la mayor contracción se observó sólo en los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con AFRs graníticos.

Cabe mencionar que la pérdida de agua que más contracción genera (a la humedad relativa estudiada) es la que se encuentra en los poros capilares de pequeño tamaño. Ello se debe a que al disminuir el tamaño del poro aumentan las fuerzas de tensión capilar (Mindess y Young 1986). Es posible entonces que se produzcan diferencias en los mecanismos de secado en los morteros con AFRs en comparación con su correspondiente mortero patrón.

En relación a lo anteriormente expuesto, si se computa la pérdida de peso relativa a la pérdida total en función de la raíz cuadrada del tiempo en escala logarítmica, es posible obtener una recta de regresión, cuya pendiente sería un indicador de la velocidad de secado de las muestras bajo estudio. Una vez que se ha perdido el agua libre, las mayores

diferencias en la contracción se producen a las primeras edades (hasta 90 días), por lo que resulta interesante realizar el análisis mencionado considerando dos intervalos. En función de los resultados presentados en la Figura 7.6, se realizará el análisis de las pendientes considerando los intervalos 1-56 días y 56-365 días. Complementariamente, se analizará el intervalo completo, 1-365 días. Una mayor pendiente de la recta de regresión a las primeras edades de evaluación conllevaría a una mayor contracción por secado, debido a una menor resistencia de la pasta de cemento a dichas edades. Consecuentemente cuanto mayor sea la velocidad con que se pierde el agua una mayor contracción es esperable.

En la Figura 7.10 se presentan las curvas pérdida de peso relativa al peso inicial respecto de tiempo para los morteros bajo estudio. De la misma surge que todos los morteros presentan buena correlación con un buen ajuste ($R^2 > 0,85$). Por tal motivo, los coeficientes podrían ser un indicador del mecanismo de pérdida de agua en los morteros. Se observa además que las curvas de regresión resultan similares en los morteros elaborados con agregados cuarcíticos, mientras que en los que se utilizó el agregado granítico las curvas presentan una mayor pendiente en los morteros reciclados respecto al patrón.

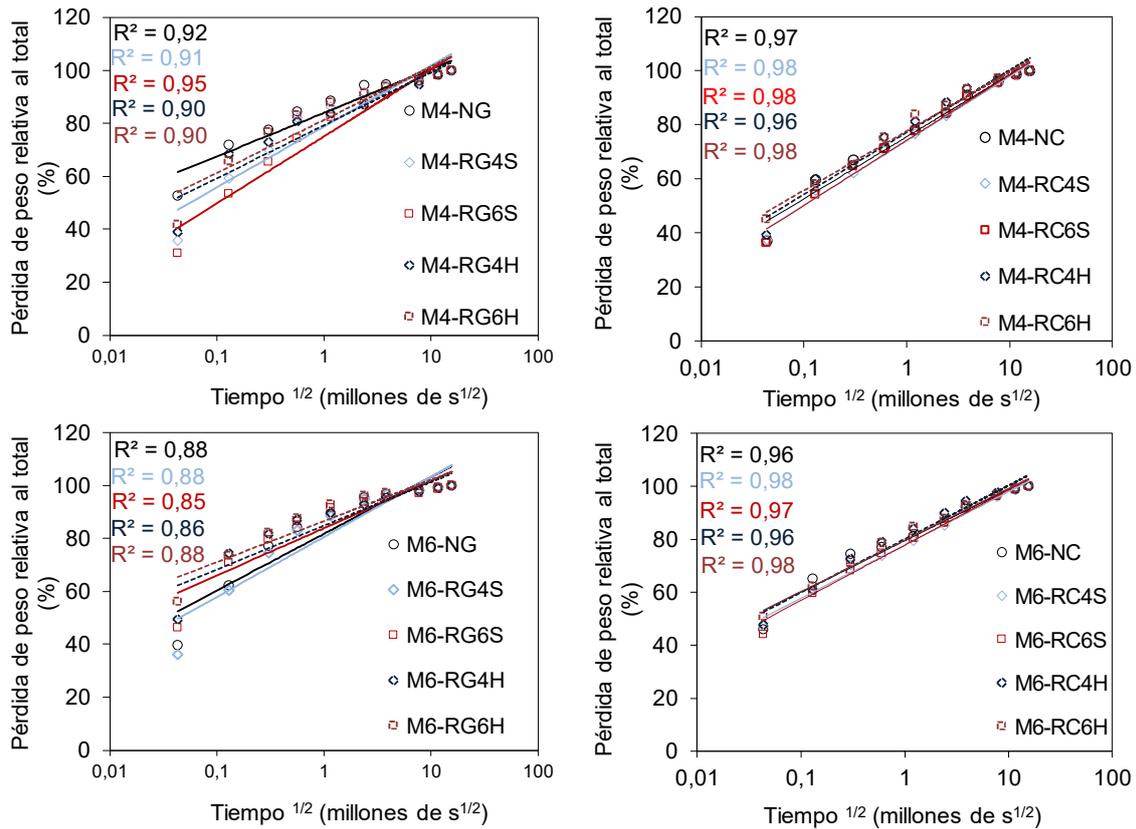


Figura 7.10. Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo

Las ecuaciones de las rectas de regresión obtenidas de las curvas pérdida de peso relativa al peso inicial respecto de tiempo para intervalos de tiempo de 1-365 días, 1-56 días y 56-365 días se presentan en la Tabla 7.2. Las gráficas correspondientes a estos dos últimos intervalos de tiempo se presentan en el Anexo II.

La utilización de los dos últimos intervalos responde a los resultados obtenidos en la contracción por secado, la cual mostro un comportamiento diferencial a partir de los 56 días. Es posible que a dicha edad se produzca un cambio en el mecanismo predominante de la contracción cambie a dicha edad. Es decir, resulta adecuado interpretar que a dicha edad el agua presente en los pequeños capilares se halla perdido casi en su totalidad y consecuentemente la división en ambos intervalos permitiría un análisis más adecuado.

Tabla 7.2. Ecuaciones de la recta de regresión

Mortero	Intervalo de tiempo (días)		
	1-365	1-56	56-365
M4-NG	$y = 7,16 \ln(x) - 15,0$	$y = 9,88 \ln(x) - 48,6$	$y = 2,94 \ln(x) + 50,4$
M4-RG4S	$y = 9,96 \ln(x) - 58,9$	$y = 13,89 \ln(x) - 107,3$	$y = 4,41 \ln(x) + 26,8$
M4-RG6S	$y = 10,78 \ln(x) - 75,6$	$y = 12,80 \ln(x) - 100,3$	$y = 10,26 \ln(x) - 68,9$
M4-RG4H	$y = 8,69 \ln(x) - 40,8$	$y = 11,15 \ln(x) - 71,1$	$y = 6,84 \ln(x) - 13,2$
M4-RG6H	$y = 8,78 \ln(x) - 40,9$	$y = 11,91 \ln(x) - 79,4$	$y = 5,32 \ln(x) + 11,9$
M6-NG	$y = 9,29 \ln(x) - 46,7$	$y = 13,71 \ln(x) - 101,2$	$y = 2,41 \ln(x) + 59,9$
M6-RG4S	$y = 9,83 \ln(x) - 55,3$	$y = 14,41 \ln(x) - 111,9$	$y = 2,56 \ln(x) + 57,4$
M6-RG6S	$y = 7,75 \ln(x) - 23,2$	$y = 11,55 \ln(x) - 70,1$	$y = 3,12 \ln(x) + 47,8$
M6-RG4H	$y = 8,68 \ln(x) - 40,6$	$y = 11,15 \ln(x) - 71,1$	$y = 6,80 \ln(x) - 12,7$
M6-RG6H	$y = 8,67 \ln(x) - 38,5$	$y = 12,07 \ln(x) - 80,4$	$y = 4,59 \ln(x) + 23,9$
M4-NC	$y = 9,95 \ln(x) - 61,9$	$y = 11,01 \ln(x) - 75,1$	$y = 8,01 \ln(x) - 31,9$
M4-RC4S	$y = 10,35 \ln(x) - 69,0$	$y = 11,03 \ln(x) - 77,5$	$y = 8,72 \ln(x) - 43,6$
M4-RC6S	$y = 10,46 \ln(x) - 70,3$	$y = 11,63 \ln(x) - 84,8$	$y = 8,37 \ln(x) - 37,8$
M4-RC4H	$y = 9,96 \ln(x) - 60,4$	$y = 11,77 \ln(x) - 82,9$	$y = 6,05 \ln(x) + 0,5$
M4-RC6H	$y = 9,51 \ln(x) - 53,7$	$y = 10,84 \ln(x) - 70,4$	$y = 6,68 \ln(x) - 9,8$
M6-NC	$y = 8,41 \ln(x) - 36,8$	$y = 9,48 \ln(x) - 50,1$	$y = 6,90 \ln(x) - 13,7$
M6-RC4S	$y = 8,71 \ln(x) - 42,5$	$y = 9,17 \ln(x) - 48,3$	$y = 7,61 \ln(x) - 25,3$
M6-RC6S	$y = 9,04 \ln(x) - 47,2$	$y = 10,14 \ln(x) - 60,8$	$y = 7,31 \ln(x) - 20,4$
M6-RC4H	$y = 8,76 \ln(x) - 41,0$	$y = 10,55 \ln(x) - 63,2$	$y = 5,17 \ln(x) + 14,9$
M6-RC6H	$y = 8,44 \ln(x) - 36,9$	$y = 9,57 \ln(x) - 50,9$	$y = 6,46 \ln(x) - 6,2$

Al evaluar la pendiente de la recta de manera integral (1-365) puede observarse con claridad que en el caso de los morteros graníticos de relación a/c 0,40 la misma resulta menor en el mortero patrón. Ello indica, que la pérdida de agua se produjo con mayor

velocidad cuando se empleó AFRs. Es de notar que las pendientes de las rectas de regresión coinciden con el comportamiento observado en los mencionados morteros frente a la contracción. En tal sentido, este comportamiento puede explicarse a partir del hecho que al eliminarse el agua tempranamente en la masa del mortero es esperable una contracción mayor, pues a menor edad menor es la resistencia de la pasta de cemento y consecuentemente mayor será la contracción última.

En contraposición, en los morteros de relación a/c 0,55 con AFRs granítico pese a que se observó que la pendiente de la recta de regresión fue mayor en el patrón respecto de los morteros reciclados, (a excepción del mortero M6-RG4S quien presenta similar pendiente que el patrón), en todos los morteros reciclados se observó una contracción del orden del 10% mayor que en el correspondiente mortero patrón.

En los morteros elaborados con agregados cuarcíticos de relación a/c 0,40 se observa que las pendientes resultaron similares a la del mortero patrón cuando se compensó la absorción del AFRs, y ligeramente mayores cuando la misma no fue considerada. En ambos casos la contracción frente al patrón fue menor. Sin embargo, cuando se compensó la absorción del AFRs las diferencias respecto del patrón fueron menores que al compensarla, comportamiento contrario al que se podría deducir de las pendientes obtenidas.

Los morteros de relación a/c 0,55 presentaron similares valores de pendiente respecto del patrón en tanto que la contracción fue del orden del 5% menor.

A partir de un análisis general, si se consideran las curvas en el intervalo 1-365 días, surge que las pendientes resultantes no reflejan los comportamientos observados frente a la contracción por secado de los morteros. Por tal motivo, no podría considerarse a la pendiente de la curva pérdida de peso relativo en función del tiempo como un estimador del comportamiento en contracción.

Si se analizan las pendientes en el primer intervalo planteado (1-56), las mismas resultan en general similar e incluso algo menor que la del correspondiente patrón, con excepción de los morteros con AFRs graníticos de relación a/c 0,40. En estos últimos, las diferencias encontradas entre la pendiente de los morteros patrones y la de los reciclados son mucho menores que las obtenidas al evaluar la curva integral (1-365).

En el intervalo (56-365) las pendientes de la recta de ajuste toman valores sustancialmente mayores en los morteros con AFRs graníticos, mientras que no presentan una tendencia definida cuando se emplearon AFRs cuarcíticos.

Al comparar las pendientes obtenidas al considerar el intervalo total (1-365) respecto de las obtenidas en el primer intervalo (1-56), se observan diferencias notorias entre el comportamiento de los morteros patrones y reciclados. Este hecho pone de manifiesto que se producen modificaciones en los mecanismos de pérdida de agua al emplear AFRs. La influencia relativa de las variables bajo estudio en el proceso de secado y su correlación con la contracción podría ser analizada con mayor detalle a partir de estudios específicos de la porosidad (cantidad y distribución de poros), la difusividad y la presión de vapor en los poros y análisis de la interfaz pasta-AFR. La complejidad que involucran dichos estudios, como así también el gran número de variables que podrían incidir sobre las determinaciones experimentales de las distintas propiedades mencionadas exceden los objetivos particulares del presente trabajo de tesis.

7.2.4 Relación contracción-pérdida de peso

La relación entre la contracción por secado y la pérdida de peso en pastas de cemento ha sido estudiada por diversos autores (Neville 1975, Roper 1966, Hansen 1987), logrando relacionar la forma que toma dicha curva con los mecanismos por los que se genera la contracción por secado.

En tal sentido, dichos estudios indican que las curvas presentan tres tramos: un primer tramo donde se evidencia una pequeña contracción inicial con una gran pérdida de peso, correspondiente a la pérdida de agua en los grandes capilares asociada al mecanismo de contracción por tensión capilar. Un segundo tramo en el que la contracción se incrementa en mayor medida que la pérdida de peso y se produce también como consecuencia de la tensión capilar producto de la pérdida de agua en los pequeños poros capilares de la pasta de cemento.

Un tercer tramo de la curva ha sido reportado para humedades por debajo del 50%, correspondiente a la tensión de desunión la cual produce una ligera contracción con una gran pérdida de peso, y resulta asociada a la pérdida de una película de agua ligada a las capas del gel de cemento hidratado. Sin embargo, estudios realizados sobre morteros (Lima y Leite 2012) han reportado que para humedades mayores al 50% se produce un aumento

del peso de los mismos con incrementos importantes de la contracción. Ello fue justificado a partir de la carbonatación de las muestras.

En Figura 7.11 se presentan las curvas contracción - pérdida de peso relativa al peso inicial para los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la misma un comportamiento diferencial en función del tipo de agregado considerado. Así, en los morteros con agregados graníticos se observa que en el primer tramo de la curva (0A) se produce una contracción mayor en el patrón respecto de los morteros reciclados. Otro hecho notorio es que tanto en el mortero patrón como en el reciclado M4-RG4S las curvas se asemejan en su segundo tramo (AB) mientras que el tercer tramo indicado en la bibliografía (Ropper 1966) no se presenta en dichos morteros. Contrariamente, en los restantes morteros con AFRs graníticos puede observarse un cambio en la pendiente de las curvas luego del segundo quiebre (B).

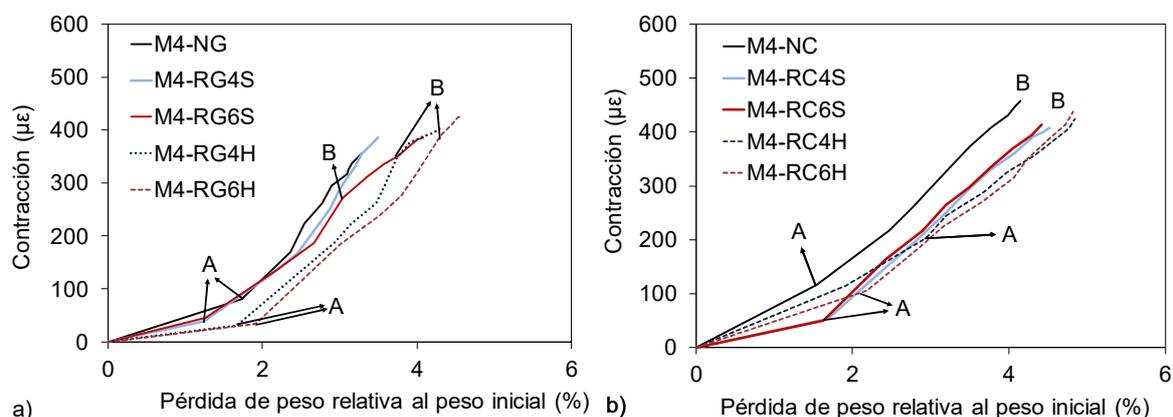


Figura 7.11. Relación entre la contracción por secado y la pérdida de peso relativa de los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Las curvas contracción - pérdida de peso de los morteros con agregados cuarcíticos resultan similares entre sí, encontrándose las mayores diferencias en el primer tramo de la curva (0A). Es de notar que en dichos morteros no se observa con claridad el segundo quiebre de las curvas. Las pendientes en el segundo tramo (AB) resultan similares para el mortero patrón y los reciclados en que no se compensó la absorción de los AFRs, y algo menores en los morteros en que dicha compensación fue realizada.

De la Figura 7.11 surge también que, para un mismo tipo de AFRs (granítico o cuarcítico), el nivel resistente del hormigón del cual provienen los AFRs no presenta una influencia relevante sobre las curvas contracción - pérdida de peso de los morteros reciclados.

Resulta notorio en las curvas de los morteros con ambos tipos de AFRs (graníticos y cuarcíticos) que la forma en que se consideró su absorción genera cambios significativos en la pérdida de peso de los morteros. Sin embargo, contrariamente a lo que pudiera esperarse, la mayor pérdida de peso no se manifiesta en una mayor contracción por secado. En tal sentido, al evaluar las curvas de los morteros en que se compensó la absorción del agregado respecto de aquellos en que no fue realizada, se observa que las mismas resultan desplazadas hacia la derecha en el eje de abscisas, sin un cambio notorio en el eje de ordenadas al origen. Este desplazamiento de las curvas podría estar asociado a los cambios observados en los mecanismos de secado en los morteros. Una explicación a este comportamiento podría encontrarse en la retención de agua de los AFRs, la cual al perderse no genera contracción adicional.

En las Figura 6.12 se presentan las curvas contracción en función de la pérdida de peso relativa al peso inicial de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos.

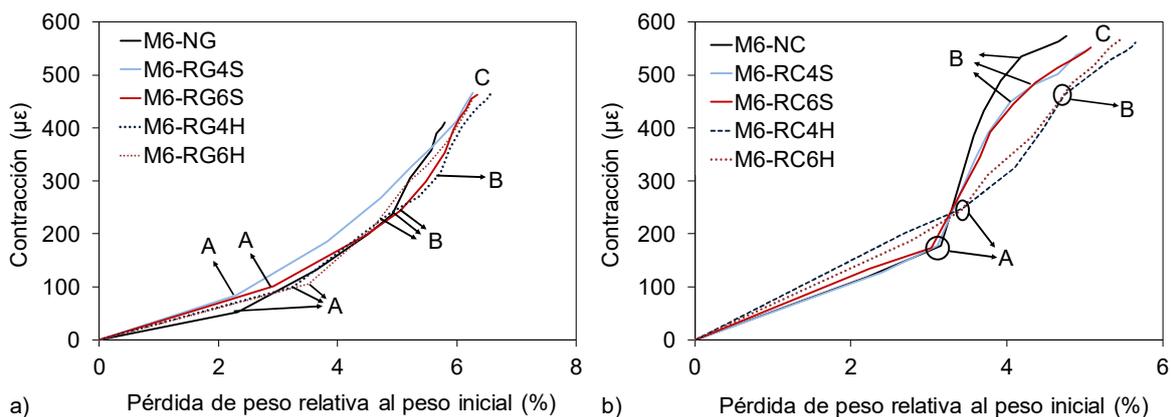


Figura 7.12. Relación entre la contracción y la pérdida de peso relativa al peso inicial de los morteros de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Puede notarse que en los morteros con agregados graníticos el comportamiento difiere sustancialmente del observado para la relación a/c 0,40. Así, el primer tramo de la curva (0A) se da con una menor contracción del mortero patrón respecto de los reciclados. En el segundo tramo (AB) la pendiente de la curva resulta similar en todos los morteros. No obstante, en el mortero patrón y en los M6-RG6S y M6-RG4H parece existir un tercer tramo (BC) en el que la contracción se incrementa con una menor pérdida de peso. Este último hecho resulta en contraposición con lo reportado por Ropper (1966) en pastas expuestas a condiciones de humedad en el entorno del 50%, aunque similar al de pastas expuestas a humedades entre 0 y 11%.

Es de notar que en este último rango de humedad, la tensión superficial es el mecanismo que gobierna la contracción por secado, el cual está íntimamente relacionado con la superficie específica de los materiales componentes (Bazant 1972 c). Sin embargo, en los morteros bajo estudio la humedad relativa se mantuvo constante durante todo el ensayo en $50 \pm 2\%$ por lo que se requiere de estudios más específicos para comprender este fenómeno.

En los morteros con agregados cuarcíticos se observa que el primer quiebre (A) de la curva se presenta con similares valores de contracción en el patrón y en los morteros reciclados en que no se compensó la absorción de los AFRs. Contrariamente, cuando se consideró la absorción de los AFRs la contracción resultó mayor. Se observa, además, que la pendiente de la curva en el hormigón patrón resulta mayor que en los morteros reciclados en el segundo tramo (AB). Ello implica que el incremento en la contracción es menor en estos últimos morteros en comparación con el patrón. Es posible diferenciar un tercer tramo de la curva (BC) en el que la pérdida de peso se incrementa en mayor magnitud respecto de la contracción.

Del análisis integral de los morteros bajo estudio en función de la contracción respecto de la pérdida de peso, no surge una tendencia clara que permita un análisis único del fenómeno. En tal sentido se verificó que la forma que toman las curvas presentadas no se corresponde en la mayoría de los morteros estudiados con lo reportado en la bibliografía.

Adicionalmente el comportamiento contracción-pérdida de peso resulta diferente en función de la relación a/c del mortero elaborado, como así también del tipo de agregado considerado. Resulta claro entonces que el empleo del AFR supone modificaciones de los mecanismos de contracción respecto de los morteros de referencia los cuales podrían estar asociados a las diferencias en la forma en que se pierde el agua de la masa del mortero.

En la generalidad de los casos para un mismo nivel de contracción la pérdida de agua es mayor en los morteros reciclados respecto del patrón. En concordancia con lo reportado por Lima y Leite (2012) ello implica una gran presencia de agua en los poros del agregado desde que la matriz de cemento resulta análoga para morteros patrones y reciclados. La retención de agua por parte de los AFRs podría tener un efecto beneficioso de autocurado interno en función de cómo se materialice el proceso de transferencia de agua hacia el medio ambiente y consecuentemente ser el responsable de las diferencias observadas en los mecanismos de secado.

El rol que ejercen las variables bajo estudio no presenta una tendencia definida. Es posible que dicha falta de tendencia esté asociada con la multiplicidad de factores que intervienen en los mecanismos por los que se produce la contracción sumado a las variables que supone el mayor contenido de pasta aportado por los AFRs, su mayor contenido de partículas menores a $75\mu\text{m}$ y el menor módulo de elasticidad frente a los agregados naturales.

Cabe mencionar que aún para morteros elaborados con agregados naturales la forma que adopta la curva contracción-pérdida de peso resultan en diferencias sustanciales particularmente en cuanto al último tramo de la curva. Dichas diferencias ponen de manifiesto la complejidad del fenómeno de la contracción por secado y la falta de un entendimiento completo y fehaciente de los mecanismos que se producen y las variables determinantes de los mismos.

7.2.5 Relación entre distintas propiedades y la contracción por secado

La resistencia a compresión, la relación a/c y el contenido unitario de agua en hormigones guardan relación con la contracción por secado. Es presumible que dichas relaciones, en mayor o menor magnitud, se produzcan también en morteros. Sin embargo, no se han encontrado en la bibliografía estudios al respecto.

En la Figura 7.13 se presenta la relación entre la contracción por secado a 365 días y la relación a/c a) total y b) potencial para los morteros en función del tipo de agregado utilizado. Puede observarse que en los morteros elaborados con agregados graníticos el ajuste obtenido no es bueno en ninguno de los dos casos.

Contrariamente en los morteros elaborados con agregados cuarcíticos el ajuste resulta bueno ($R^2 > 0,94$) tanto para la relación a/c total como para la efectiva. No obstante, puesto que la distribución de puntos es tal que se encuentra nucleada en los extremos (en coincidencia con las dos relaciones a/c evaluadas) no resulta suficiente para concluir que dicho parámetro defina la contracción por secado. A pesar de ello una clara tendencia a incrementarse la contracción con el aumento de la relación a/c (sea total o efectiva) resulta evidente para los morteros con ambos tipos de agregados (graníticos y cuarcíticos).

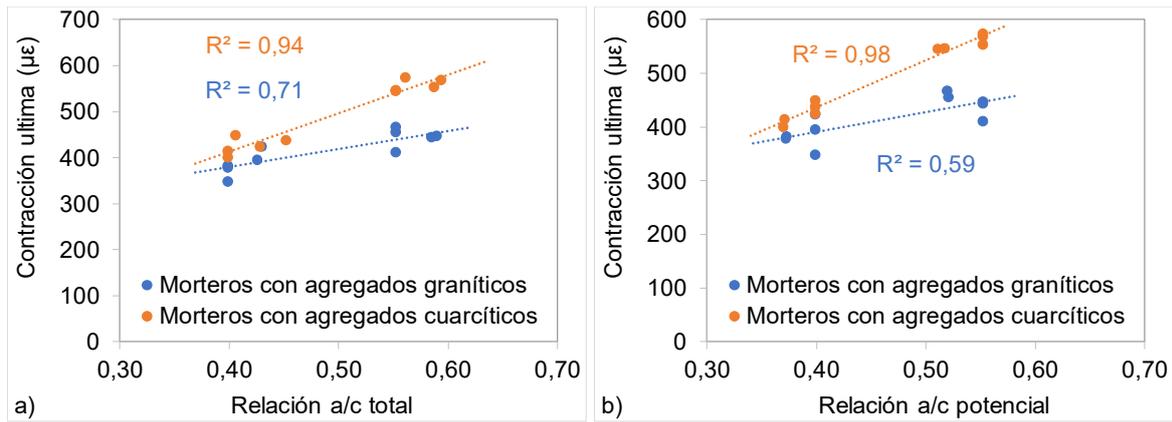


Figura 7.13. Relación entre la contracción por secado y la razón a/c a) total y b) efectiva

Por otra parte, las pendientes de las curvas de regresión presentan diferencias significativas en función del tipo de agregado considerado. En los morteros con AFRs cuarcíticos el aumento en la relación a/c causa un incremento considerable en la contracción por secado, en tanto que en los morteros con AFRs graníticos tal aumento no resulta de la misma magnitud.

La relación entre la resistencia a compresión de los morteros y la contracción por secado en función del tipo de agregado se presenta en la Figura 7.14 para los morteros a) patrones y reciclados y b) sólo morteros reciclados. Resulta claro que, al agrupar morteros patrones y reciclados el ajuste de la curva de regresión resulta bueno sólo para los morteros con agregados cuarcíticos, mientras que al considerar sólo los morteros reciclados la correlación resulta buena en los morteros graníticos y muy buena en los cuarcíticos.

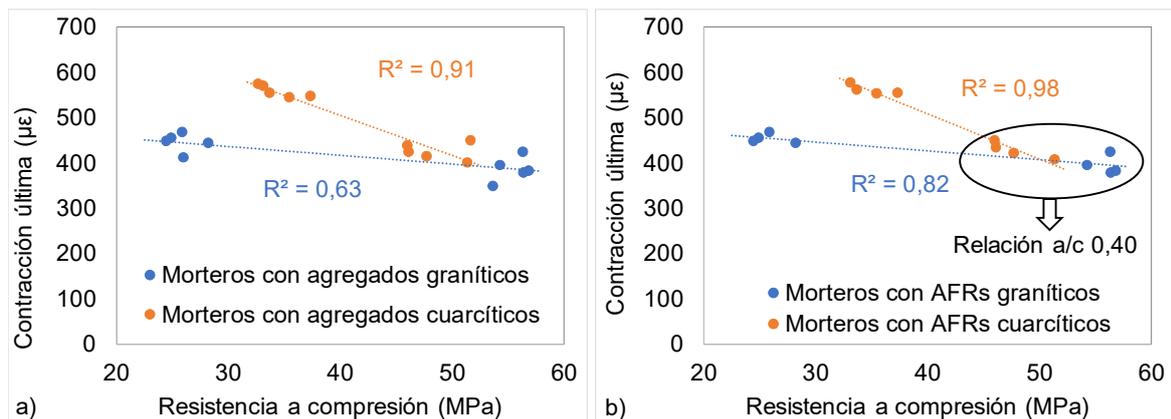


Figura 7.14. Relación entre la contracción por secado de a) morteros patrones y reciclados y b) sólo morteros reciclados

Un hecho interesante que surge de la figura es que los morteros de relación a/c 0,40 se agrupan dentro de un mismo nivel de contracción por secado independientemente del

tipo de agregado considerado y la resistencia a compresión obtenida. Este hecho indicaría que al disminuir la relación a/c disminuye también la influencia de los agregados en la contracción por secado de los morteros, tal como fuera analizado al evaluar la contracción de los morteros en función del tiempo.

La relación entre la contracción por secado y la porosidad de los morteros bajo estudio se presenta en la Figura 7.15. Un buen ajuste se ha obtenido para los morteros con ambos tipos de agregados utilizados ($R^2 > 0,87$). Otro hecho notorio es que las pendientes de la recta de regresión resultan similares.

Puede observarse además que al aumentar la porosidad del material se produce un incremento en la contracción por secado. Esta relación resulta evidente si se considera que la contracción por secado (a la humedad estudiada del 50%) se encuentra íntimamente relacionada con las tensiones capilares que se generan al vaciarse los poros capilares, los cuales a la vez son los que intervienen al evaluar la porosidad de acuerdo al procedimiento normalizado para hormigones (ASTM C 642).

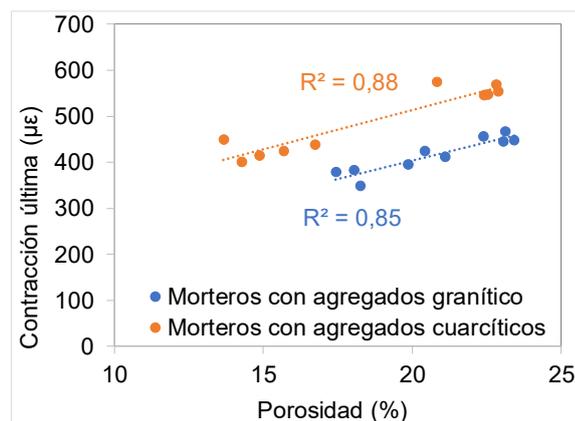


Figura 7.15. Relación entre la contracción por secado y la porosidad de los morteros bajo estudio

La buena correlación obtenida entre la contracción por secado y la porosidad contrasta con la observada al relacionar la porosidad respecto de la pérdida de peso (ver Figura 6.9), especialmente en los morteros con agregados cuarcíticos. Tales resultados podrían interpretarse como un claro indicio respecto a la presencia de agua en los poros de los AFRs.

7.3 Hormigones

7.3.1 Método de ensayo

Para la evaluación de la contracción por secado en hormigones se utilizó la norma IRAM 1597:1955. Esta norma fue actualizada en el año 1992, siendo la principal diferencia las dimensiones de las probetas. La elección de dicha normativa se basó en las consideraciones realizadas en el Capítulo 2 (Estado del Arte) respecto de las dimensiones del elemento bajo análisis en la contracción.

En la norma del año 1955 las dimensiones de la probeta eran de 70 x 100 x 430 mm y consecuentemente la relación volumen/superficie efectiva es 35 mm. En la actualización de la citada norma (año 1992) las dimensiones de la probeta son 100 x 100 x 250 mm y consecuentemente el coeficiente volumen/ superficie efectiva es de 50 mm. Debido a ello y en coincidencia con lo indicado por distintos autores (Bazant et al 2000, Ayano y Wittmann 2002, Ba et al 2013) una mayor relación volumen/superficie de la probeta induce una mayor contracción. Es de notar que cuanto menor sea el valor de la contracción última la influencia relativa sobre la misma que pudiera tener el empleo de AFRs tendrá un impacto mayor. Por lo tanto y con el fin de disminuir la influencia de factores externos a los planteados como variables de estudio, se decidió utilizar probetas con las dimensiones indicadas en la norma IRAM 1597:1955 a pesar de no encontrarse vigente.

7.3.2 Contracción por secado en función del tiempo

En la Figura 7.16 se presentan los valores promedios de la contracción por secado a diferentes edades junto con el desvío estándar obtenido para el conjunto de las cuatro probetas evaluadas. Cabe mencionar que la normativa nacional no indica la dispersión máxima entre valores o el desvío estándar admisible.

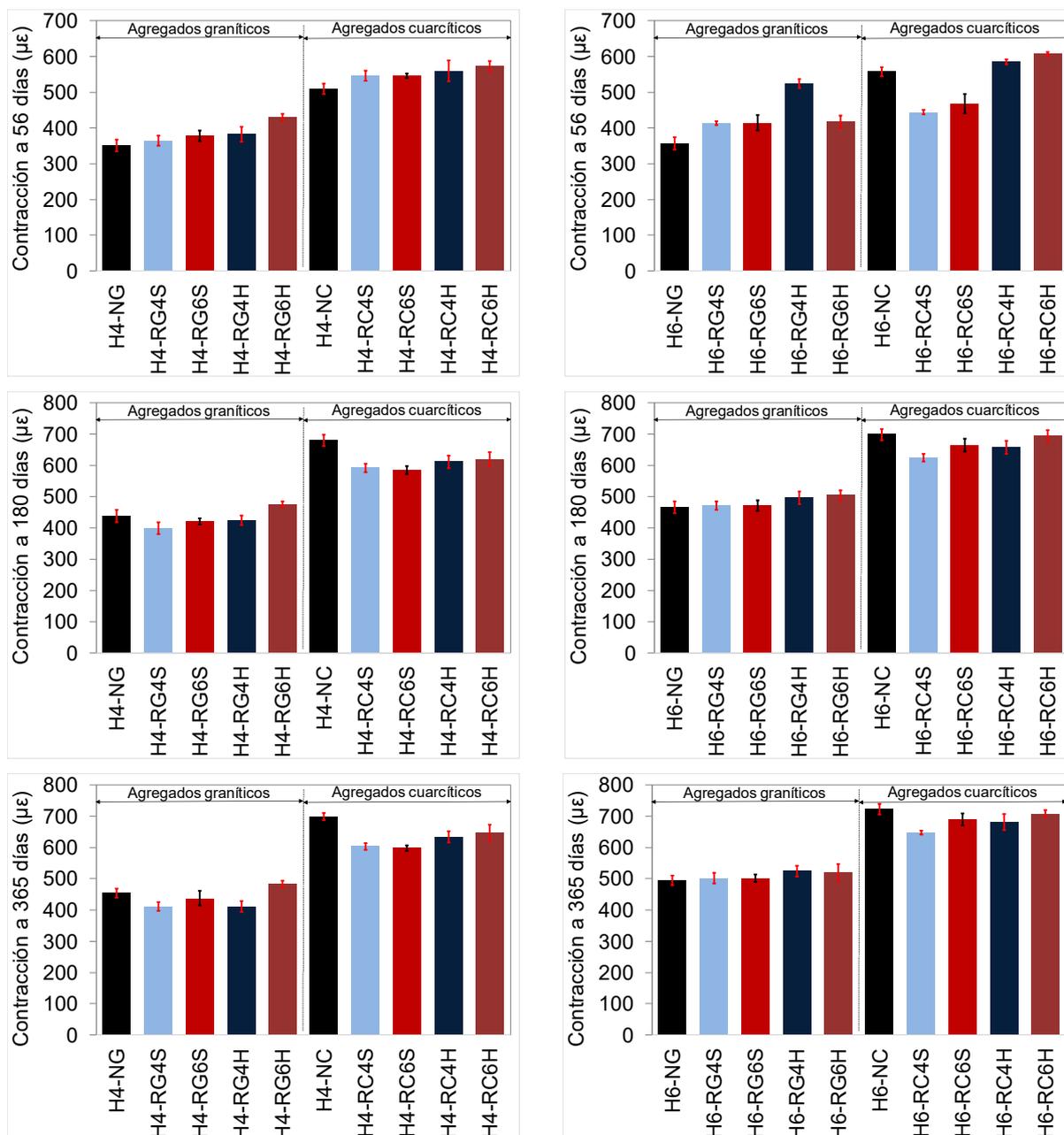


Figura 7.16. Valores promedios de la contracción y desvío estándar a distintas edades de evaluación para los hormigones de relación a/c a-c) 0,40 y d-f) 0,55

Se observa que en todos los casos los desvíos estándar no resultan significativos, así como tampoco se observa una tendencia que permita indicar que tal parámetro resulta en un comportamiento diferencial en los hormigones reciclados respecto del patrón. En adelante, para una mayor claridad, se utilizará el valor de contracción promedio de cada hormigón para el análisis comparativo entre los mismos.

La forma típica que presentan las curvas contracción tiempo se caracteriza por una gran pendiente al inicio y una pendiente asintótica hacia el final. La gran pendiente al inicio de las curvas corresponde a la pérdida de agua absorbida. La pendiente asintótica posterior se debe a que gran parte de la contracción ya se ha generado. En tal sentido, Neville (1975) indica que el 80% de la contracción a 20 años se produce en 90 días, mientras que un 85% se produce en el término de un año. La disminución en el incremento de la contracción a partir de los 90 días se debe a dos factores: el gradiente de humedad disminuye y la masa de hormigón encuentra un equilibrio higroscópico (Hansen 1987) a la vez que la resistencia del hormigón a deformarse se incrementa.

En la Figura 7.17 se presentan la contracción por secado en función del tiempo para los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. La forma de las curvas resulta similar para los hormigones patrones y reciclados con ambos tipos de AFR considerado, es decir, un gran incremento de la contracción en las primeras edades y luego una pendiente asintótica de la curva.

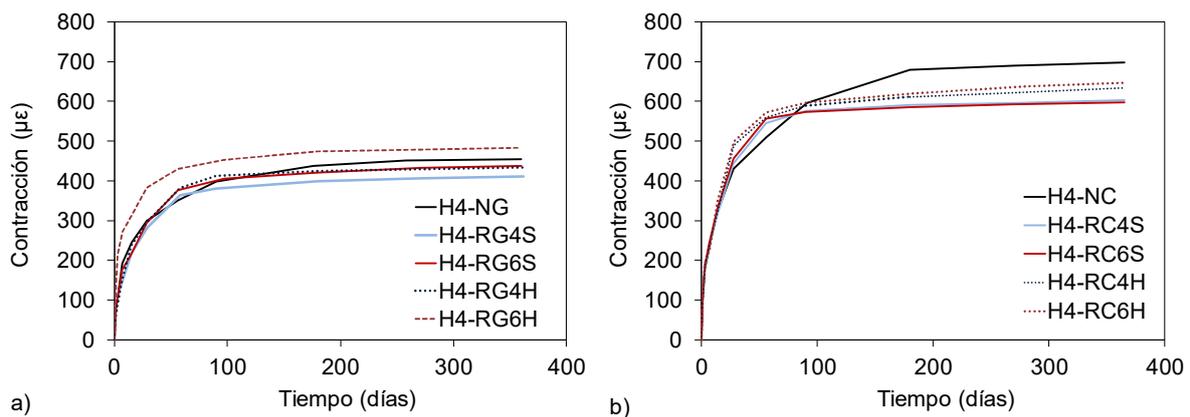


Figura 7.17. Contracción por secado en función del tiempo para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Por otra parte, puede observarse que el nivel de contracción es mucho mayor en los hormigones elaborados con agregado cuarcítico respecto de los hormigones con agregado granítico. Este hecho debe ser atribuido al menor módulo de elasticidad del agregado grueso cuarcítico frente al del granítico (la mineralogía del agregado grueso coincide con el tipo de AFR utilizado). En tal sentido, como ha sido desarrollado en el Capítulo 2, el módulo de elasticidad del agregado es un factor determinante frente a la contracción, puesto que determina la capacidad del hormigón a deformarse e impone restricciones a la contracción de la pasta de cemento.

Resulta evidente en la Figura 7.17 que el nivel de contracción de los hormigones de relación a/c 0,40 reciclados y patrones es similar en los elaborados con agregado granítico y notablemente inferior (respecto del patrón) en los hormigones elaborados con AFRs cuarcíticos.

Respecto a las variables bajo estudio, resulta claro que el nivel resistente del hormigón de origen ejerce influencia en la contracción última de los hormigones elaborados con agregado granítico. En tal sentido, se observa que los hormigones elaborados con el agregado RG6 presentan una contracción por secado a 365 días del orden del 5% mayor en comparación con los hormigones elaborados con el agregado RG4 cuando no se compensó la absorción y del orden del 10 % mayor cuando dicha compensación fue realizada.

En los hormigones con AFRs cuarcítico no se observa influencia alguna del nivel resistente del hormigón de origen cuando no se realizó la compensación de la absorción, mientras que cuando sí fue realizada la contracción a 365 días resulta un 5% mayor para el hormigón elaborado con el agregado RC6 respecto del RC4.

La metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs parece ejercer influencia en la contracción por secado de los hormigones. En tal sentido, cuando se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción del AFR la contracción por secado resultó mayor respecto de cuando no fue considerada. Las diferencias obtenidas entre ambas formas de considerar la absorción fueron en torno al 5% en los hormigones con agregados RG4 y RC4 y del orden del 8% para los elaborados con RG6 y RC6.

Los resultados obtenidos sugieren que la forma en que se considera la absorción del agregado resulta en una variable que podría incrementar la contracción por secado alrededor de un 10%. Este hecho puede explicarse a partir de la relación que existe entre el contenido unitario de agua en el hormigón y la contracción por secado.

Adicionalmente, como quedara manifestado en la discusión de resultados en capítulos anteriores, el agua adicional utilizada en los hormigones para compensar la absorción de los agregados no fue completamente absorbida por ellos. Consecuentemente, parte del agua adicionada permanece como agua libre modificando la relación a/c y el contenido de agua originalmente planteado.

En la Figura 7.18 se presenta la contracción por secado de los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Surge de la Figura que el comportamiento en contracción de los hormigones presenta ligeras diferencias respecto de lo observado en el caso de los de relación a/c 0,40. En tal sentido, en aquellos elaborados con AFRs graníticos puede diferenciarse con claridad que la contracción resultó similar a la del patrón en aquellos casos en que no se compensó la absorción de los agregados. Contrariamente, cuando se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a la absorción del AFR la contracción resultó en torno al 10% mayor respecto del hormigón de referencia.

Por otra parte, ninguna tendencia clara surge sobre la influencia que ejerce la calidad del hormigón de origen de los AFRs sobre la contracción por secado, presentando los hormigones elaborados con una misma metodología de considerar la absorción del AFR un mismo nivel de contracción última.

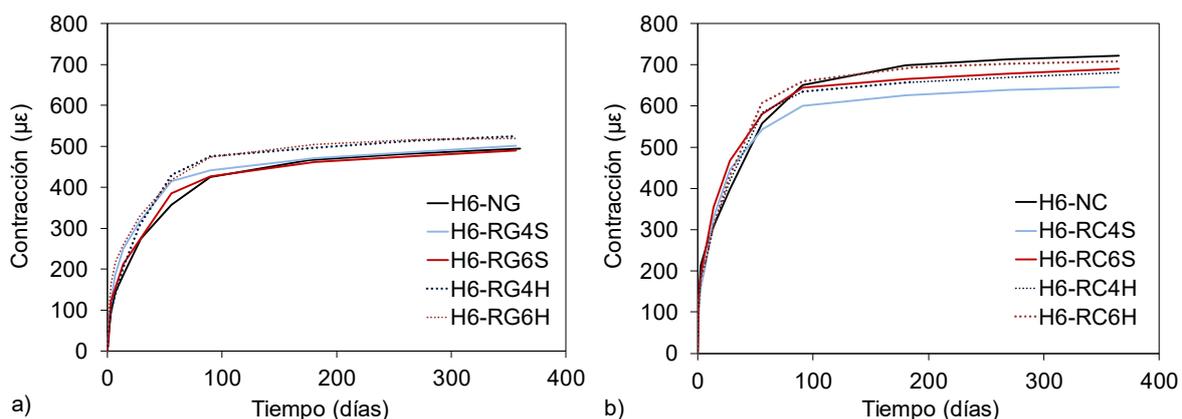


Figura 7.18. Contracción por secado en función del tiempo para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

En los hormigones elaborados con AFRs cuarcíticos se observa una ligera influencia del nivel resistente del hormigón de origen del cual provienen los AFRs. Así, los hormigones en que se emplearon los agregados RC4 presentaron una contracción entre un 4 y 7% menor respecto a los hormigones en que se emplearon los agregados RC6.

La compensación de la absorción de agua de los AFRs produjo incrementos en la contracción de alrededor de un 5% respecto de aquellos hormigones en que no se consideró la absorción del AFR.

A continuación, se presenta a modo de resumen la incidencia que mostraron las distintas variables en estudio sobre la contracción por secado de los hormigones. Con relación al nivel resistente de los hormigones que dieron origen a los AFRs, cabe considerar que las diferencias de resistencia entre los de relación a/c 0,40 y 0,55 fueron del 57% (16,5 MPa) para los AFRs graníticos y del 40% (10,5 MPa) para los cuarcíticos. Tales diferencias produjeron sobre la contracción por secado diferencias menores al 8%. Dicha variación en términos prácticos no resulta significativa. Adicionalmente, la influencia relativa que posee dicha variable parece depender de la metodología empleada al considerar la absorción del AFR y de la relación a/c del hormigón elaborado.

Del análisis de la contracción en los hormigones de relación a/c 0,40 y 0,55 elaborados con AFRs graníticos y cuarcíticos, surge que el nivel resistente del hormigón del cual provienen los AFRs ejerce una ligera influencia en la contracción por secado.

Con relación a la forma en que se consideró la absorción de los AFRs, parece tener una influencia mayor en los hormigones de relación a/c 0,40 que en los de relación a/c 0,55, para ambos tipos de agregados utilizados (graníticos y cuarcíticos). Tal situación podría deberse a que parte del agua adicionada para compensar la absorción de los AFRs no es absorbida por los mismos. Por lo tanto, esa agua adicional podría ejercer una influencia mayor cuando mayor es la calidad de la pasta de cemento del hormigón elaborado.

Se ha presentado hasta el momento la contracción en función del tiempo, observándose que en general se obtiene el mismo nivel de contracción a 365 días en los hormigones reciclados y de referencia cuando la misma cantidad de agua se ha empleado en su elaboración. Sin embargo, a pesar de la similitud entre las curvas, resulta interesante analizar el comportamiento relativo al del hormigón de referencia a cada edad evaluada. Con este fin se presenta en la Figura 7.19 la contracción de los hormigones reciclados relativa a la del patrón en función del tiempo, para los hormigones con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarcíticos, de relación agua cemento a-b) 0,40 y c-d) 0,55.

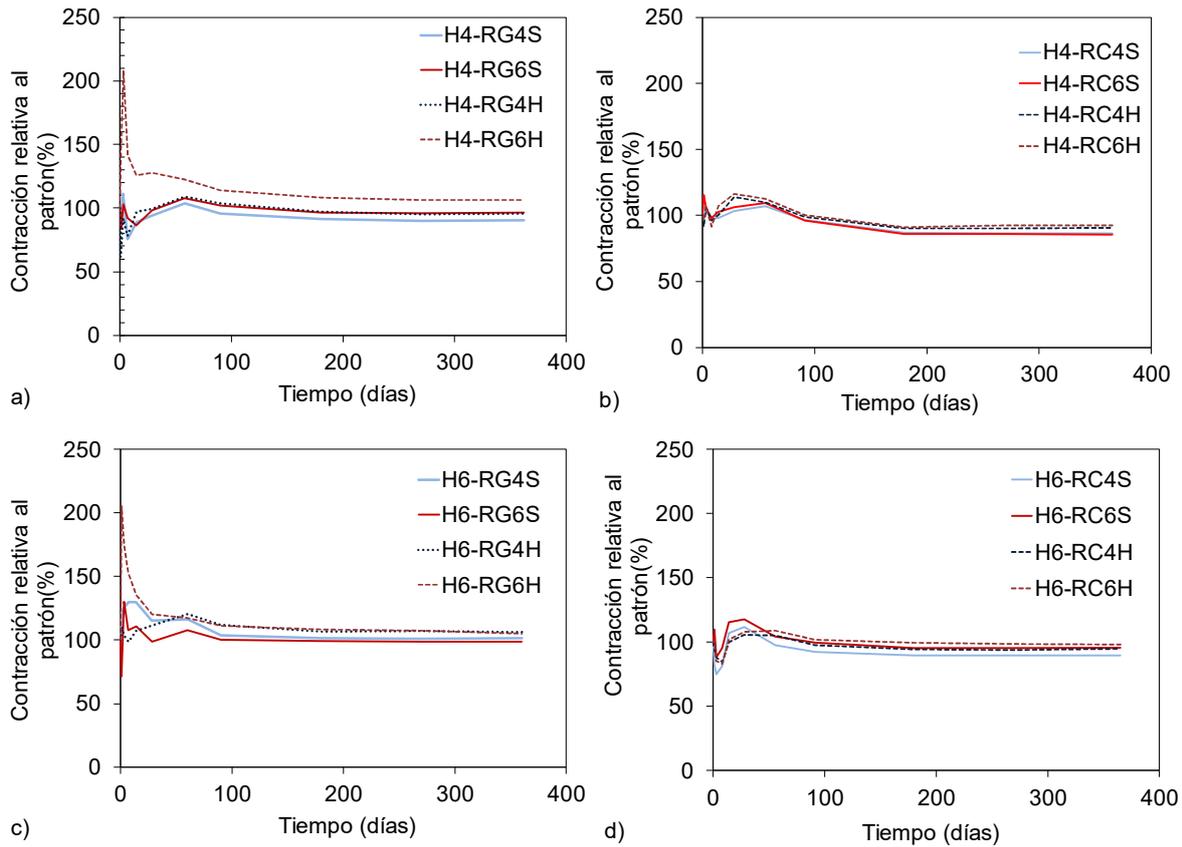


Figura 7.19. Contracción por secado relativa al hormigón patrón

Es de notar que hasta la edad de 56 días la contracción por secado de todos los hormigones con agregados reciclados presenta un comportamiento errático respecto de la evaluada en los hormigones patrones. Se observan a primeras edades valores notablemente mayores a los del patrón con picos de hasta un 200%, y luego valores menores en hasta un 30% por debajo de la contracción del respectivo patrón. Transcurrido ese lapso de tiempo (que resulta del orden de los 56 días), la contracción por secado se vuelve estable y con tendencia definida respecto del patrón.

Se analizará en adelante el comportamiento de cada hormigón transcurrido los 56 días. El análisis previo a dicha edad se realizará más adelante con el auxilio de las curvas en escala logarítmica a fin de tener un detalle más claro del comportamiento hasta dicha edad.

Surge de la Figura que transcurridos los 56 días el comportamiento respecto del patrón difiere en función del tipo de agregado considerado y la relación a/c del hormigón elaborado.

En los hormigones con AFRs granítico de relación a/c 0,40, con excepción del H4-RG6H, la contracción por secado resulta del mismo nivel respecto del patrón a toda edad posterior a los 56 días. A partir de dicha edad y hasta los 365 días la pendiente de la curva disminuye ligeramente. Este hecho indica que a partir de los 56 días el incremento en la contracción es mayor en el hormigón de referencia que en los hormigones en los que se empleó AFR. En tal sentido, al evaluar la contracción por secado a la edad de 56 días, ésta resulta entre un 3 y 10% mayor que la del correspondiente patrón, mientras que la contracción última se encuentra entre el 3 y 5% por debajo de la registrada en el patrón.

Un comportamiento similar al descrito en el párrafo precedente fue observado en los hormigones con AFRs cuarcíticos de relación a/c 0,40. Entre los 56 y los 90 días la contracción en el hormigón patrón crece significativamente más que en los hormigones reciclados. Debido a ello, en la Figura 6.19 se observa que la curva tiene una pendiente negativa. Transcurridos los 90 días la curva adquiere una pendiente menor, lo cual implica un crecimiento de la contracción ligeramente menor respecto del patrón. Superados los 90 días las curvas no presentan pendiente y por lo tanto el incremento en la contracción resulta similar en los hormigones patrones y reciclados.

Un mismo nivel de incremento en la contracción luego de transcurridos los 90 días fue encontrado en los hormigones elaborados con AFRs granítico de relación a/c 0,55. En ellos es posible inferir (debido a la gran pendiente negativa de la curva contracción-tiempo) que entre los 56 y los 90 días la contracción por secado se incrementa en mayor medida en el hormigón patrón respecto de los hormigones reciclados. Transcurrida dicha edad la pendiente se hace nula lo cual implica que el incremento de la contracción resulta similar respecto del patrón.

En los hormigones elaborados con AFRs cuarcíticos de relación a/c 0,55, transcurridos los 56 días, la pendiente se mantiene prácticamente constante hasta los 365 días y con pendiente ligeramente negativa. Ello indica, una vez más, que el incremento en la contracción de los hormigones reciclados es menor que el evaluado en el hormigón patrón. No obstante, en el caso de estos hormigones el fenómeno pareciera darse más gradualmente que en los restantes casos analizados.

Al analizar la contracción por secado de los hormigones reciclados en función de la correspondiente al hormigón patrón, surge que el comportamiento de los hormigones con AFRs difiere del observado en el patrón en función de la edad. Estas diferencias se

manifiestan principalmente a las primeras edades de evaluación, en donde la contracción por secado de los hormigones reciclados no parece seguir una tendencia definida. Superada dichas edades las curvas analizadas permiten inferir que el incremento de la contracción en los hormigones patrones es mayor al que se produce en los hormigones elaborados con AFRs en la generalidad de los casos.

Con relación al análisis de la contracción a las primeras edades, a fin de una mejor visualización del fenómeno de contracción, se presentan en la Figura 7.20 las curvas de contracción en función del tiempo en escala logarítmica para los hormigones de relación a/c 0,40 con agregado a) granítico y b) cuarcítico.

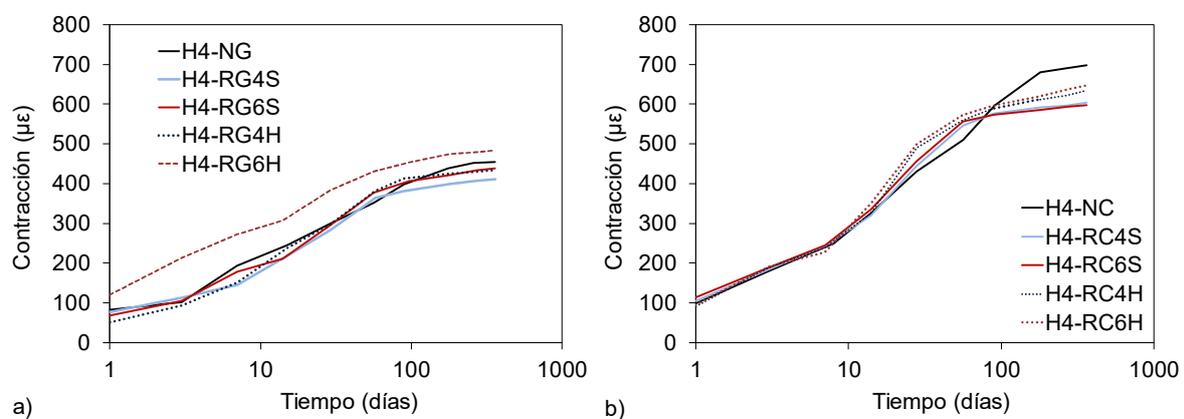


Figura 7.20. Contracción por secado en función del tiempo en escala logarítmica para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

En los hormigones reciclados, a excepción del H4-RG6H el cual presenta una mayor contracción a toda edad, hasta los 3 días la contracción resultó similar a la del hormigón patrón, en tanto que entre los 7 y 15 días la contracción fue menor en los hormigones reciclados. A la edad de 28 días la contracción nuevamente resulta similar en todos los hormigones. Transcurrida dicha edad y hasta los 56 días la contracción se incrementó en mayor magnitud en los hormigones reciclados en comparación con el hormigón patrón. Superada dicha edad y hasta los 365 días de evaluación el incremento resultó mayor en el hormigón patrón.

En los hormigones elaborados con agregados cuarcíticos resulta evidente que para edades menores a 7 días la contracción fue de similar magnitud para todos los hormigones. A partir de dicha edad la pendiente que toma la curva es mayor en el caso de los hormigones reciclados hasta la edad de 56 días. A partir de dicha edad la pendiente de la

curva presenta una reducción significativa de la pendiente en los hormigones reciclados, en tanto que en el patrón dicho cambio se observa a la edad de 180 días.

En ambos tipos de hormigones (graníticos y cuarcíticos) se observa que durante las primeras edades la contracción en los hormigones reciclados fue menor que la obtenida en el correspondiente patrón. A edades intermedias (desde el primer y hasta los 56 días) la contracción de dichos hormigones se incrementa con una magnitud mayor que la observada en el correspondiente patrón. Sin embargo, dicho incremento en ambos tipos de hormigones patrones (graníticos y cuarcíticos) se prolonga por más tiempo que en los hormigones reciclados y consecuentemente la contracción última resulta similar en los hormigones graníticos y significativamente menor en los cuarcíticos.

La explicación a este comportamiento podría encontrarse en cambios en la forma en que el agua se transfiere desde la masa del hormigón al ambiente. Un análisis más profundo al respecto podrá realizarse al evaluar las curvas contracción en función de la pérdida de peso de las muestras.

Resulta evidente, además, que el comportamiento errático observado en la Figura 6.19 hasta la edad de 56 días se produce como consecuencia de las distintas pendientes y sus respectivos cambios, lo cual produce que, hasta la mencionada edad, las curvas de los hormigones patrones y reciclados se intercepten en varias oportunidades.

En la Figura 7.21 se presentan las curvas contracción por secado-tiempo en escala logarítmica para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregado a) granítico y b) cuarcítico.

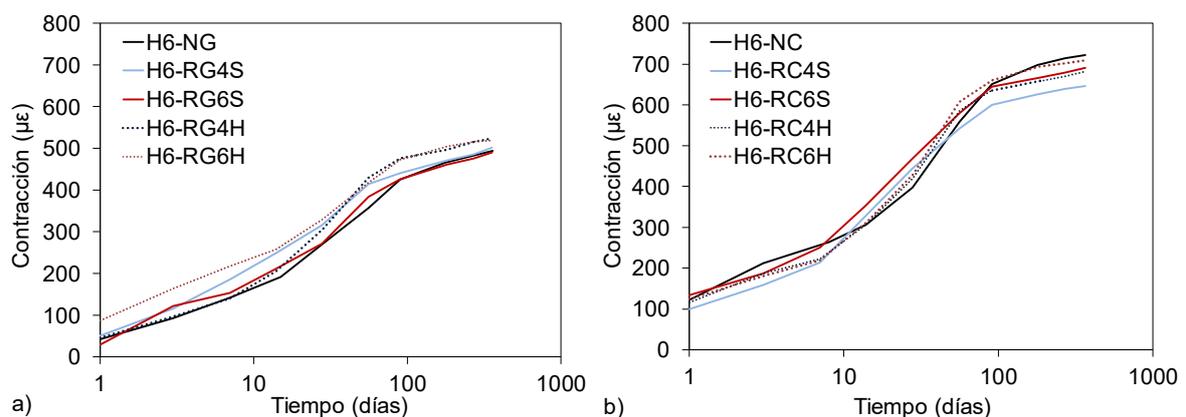


Figura 7.21. Contracción por secado en función del tiempo en escala logarítmica para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Puede notarse que ambos hormigones presentan un comportamiento diferente al observado en los hormigones de relación a/c 0,40. En tal sentido en los hormigones graníticos, a primeras edades se observa una contracción mayor en los hormigones reciclados en comparación con el patrón. Otra diferencia notoria frente a los hormigones de relación a/c 0,40 es que la disminución de la pendiente se da a la edad de 90 días tanto en los hormigones patrones como reciclados.

En los hormigones cuarcíticos entre 1 y 7 días la contracción por secado resulta mayor en el patrón que en los hormigones reciclados. A la edad de 14 días la contracción resulta similar a la del patrón. A partir de dicha edad la pendiente similar a la del patrón se observa sólo en los hormigones en los que se compensó la absorción del agregado. En tanto que cuando no se consideró la absorción de los AFRs la pendiente de la curva resulta ligeramente menor que la del correspondiente patrón. A la edad de 90 días la pendiente de la curva disminuye notoriamente tanto en el hormigón patrón como en los reciclados. No obstante, tal cambio de pendiente es mucho más notorio en los hormigones reciclados que en el correspondiente patrón y consecuentemente la contracción en este último resulta mayor que en los hormigones reciclados.

Al evaluar la contracción en función del tiempo en escala logarítmica resulta notorio que el comportamiento en contracción de los hormigones reciclados presenta diferencias respecto de los hormigones patrones, a pesar de las pequeñas diferencias encontradas al evaluar la contracción última. Dichas diferencias, además, resultan significativas en los hormigones de relación a/c 0,40, en tanto que en aquellos de relación a/c 0,55 no toman mayor dimensión.

En tal sentido, en los hormigones de relación a/c 0,40 las mencionadas diferencias radican especialmente en la magnitud del incremento de la contracción en edades intermedias (entre los 14 y 56 días), el cual resulta mayor en los hormigones reciclados. Sin embargo, dicho incremento se prolonga por más tiempo en los hormigones patrones en comparación con los hormigones reciclados. Este comportamiento resulta útil para interpretar los cambios en las pendientes encontradas al evaluar la contracción de los hormigones reciclados de manera relativa a la del respectivo patrón.

En los hormigones de relación a/c 0,55 las diferencias encontradas entre hormigones patrones y reciclados no resultan de mayor relevancia en los hormigones graníticos. En tal sentido podría interpretarse como similares a la del hormigón patrón en cuanto a sus

pendientes. En tanto que en los hormigones cuarcíticos resulta relevante que la pendiente en el último tramo de la curva (edades mayores a 90 días) sea mayor en el hormigón patrón.

7.3.3 Relación entre la contracción del hormigón patrón y los hormigones reciclados

Del análisis anteriormente realizado surge que la contracción de los hormigones reciclados difiere respecto a la del patrón en función de la edad considerada, presentando en términos generales una menor contracción en las primeras edades de evaluación. Con el avance de la edad dicha contracción puede resultar menor, similar en función de las variables bajo estudio. Por ello, resulta conveniente relacionar la contracción a cada edad de los hormigones reciclados con la del correspondiente patrón. De esta forma, si el ajuste resulta confiable es posible obtener, por medio de regresión lineal, un coeficiente que permita estimar la contracción de los hormigones reciclados a partir de la obtenida en el patrón tal como fuera indicado por Sánchez de Juan (2005).

En tal sentido, Rilem (1994) presenta valores de corrección para estimar la contracción de hormigones reciclados respecto de un hormigón patrón de similares características. Dicho coeficiente es de 1,5 cuando un porcentaje mayor a 20% de AGR es utilizado. No obstante, el mismo es proporcionado para hormigones en los que se emplea sólo la fracción gruesa del agregado reciclado. Dicho coeficiente permite interpretar que la contracción en hormigones en los que se emplea AGR puede resultar hasta un 50% mayor que la obtenida en hormigones con similares dosificaciones elaborados con agregados naturales.

Se presenta en la Figura 7.22 las relaciones entre las contracciones para los hormigones elaborados con a-c) AFRs graníticos y b-d) AFRs cuarcíticos, de relación a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55. El coeficiente de correlación obtenido en todos los casos muestra un muy buen ajuste de la recta de regresión ($R^2 > 0,96$). Se observa, además, que las pendientes de las curvas resultan similares para los distintos hormigones de una misma relación a/c y tipo de AFR considerado.

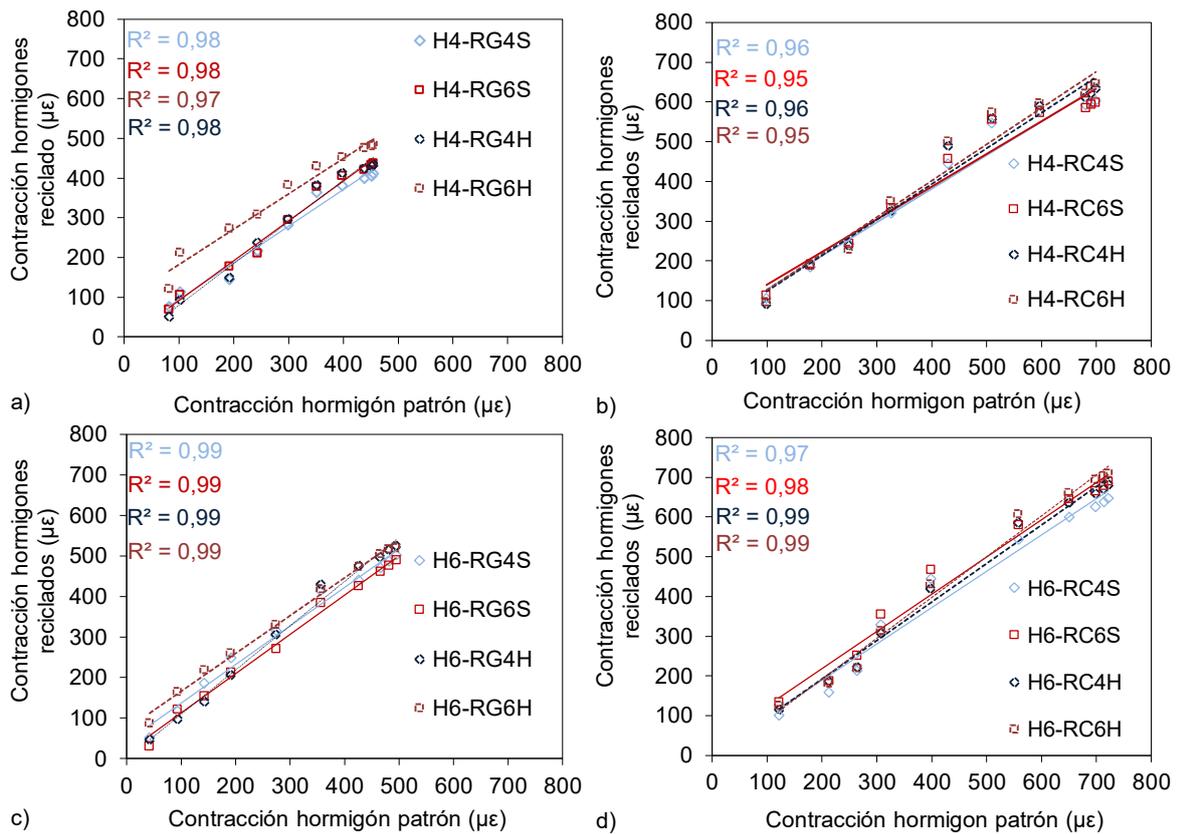


Figura 7.22. Relación entre la contracción por secado de hormigones patrones y reciclados de relación a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55 elaborados con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarzíticos

Las ecuaciones de la recta de ajuste de cada uno de los hormigones bajo estudio se presentan en la Tabla 7.3. Surge de la misma que en los hormigones elaborados con agregados graníticos la pendiente de la recta de regresión varía entre 0,88 y 1,04 para la relación a/c 0,40 y entre 0,93 y 1,09 para la relación a/c 0,55. Los coeficientes de ajuste menor a la unidad implican una menor contracción en los hormigones reciclados respecto de los patrones. En los hormigones cuarzíticos dichas pendientes toman valores entre 0,82 y 0,91 para la relación a/c 0,40 y entre 0,91 y 1,02 para los de relación a/c 0,55.

Tabla 7.3. Ecuación de la recta de ajuste de la relación de proporcionalidad entre la contracción del hormigón patrón y los hormigones reciclados

Hormigón	Ecuación de la recta de ajuste	Hormigón	Ecuación de la recta de ajuste
H4-RG4S	$y = 0,9208x + 2,4566$	H4-RC4S	$y = 0,8442x + 44,7$
H4-RG6S	$y = 1,002x - 8,6194$	H4-RC6S	$y = 0,8219x + 58,007$
H4-RG4H	$y = 1,047x - 24,012$	H4-RC4H	$y = 0,8982x + 34,683$
H4-RG6H	$y = 0,8883x + 93,973$	H4-RC6H	$y = 0,9169x + 35,026$
H6-RG4S	$y = 0,954x + 40,217$	H6-RC4S	$y = 0,9128x + 5,9036$
H6-RG6S	$y = 0,9719x + 14,19$	H6-RC6S	$y = 0,9356x + 30,568$
H6-RG4H	$y = 1,0932x - 0,7411$	H6-RC4H	$y = 0,968x - 1,4899$
H6-RG6H	$y = 0,9329x + 71,9$	H6-RC6H	$y = 1,0261x - 13,137$

Resulta evidente que los coeficientes hallados de esta manera no reflejan con exactitud lo observado en cuanto a los valores de contracción a 365 de los hormigones reciclados. A modo de ejemplo, el hormigón H6-RG6H, el cual presenta una contracción a 365 días 6% mayor que el correspondiente patrón, exhibió un coeficiente de 0,93, lo cual implicaría que la contracción es menor que en el correspondiente patrón.

Sin embargo, si se lo interpreta como un estimador de la contracción respecto del patrón su interés práctico queda de manifiesto. En tal sentido, los resultados obtenidos denotan la similitud encontrada entre la contracción por secado de hormigones patrones y reciclados. Es de notar que aún en los casos en que la contracción por secado resultó mayor en los hormigones reciclados, las diferencias obtenidas no superan el 10%. En tanto que los coeficientes obtenidos resultan cercanos a la unidad, indicando la similitud en los valores de contracción entre hormigones patrones y reciclados.

7.3.4 Pérdida de agua de los hormigones

Como fuera discutido en el Capítulo 2, la contracción por secado se produce por los cambios de humedad en el interior de la masa del hormigón. Diferentes autores han encontrado una relación directa entre la pérdida de peso (correspondiente al agua perdida) que experimentan las probetas ensayadas y la contracción de las mismas a distintas

edades. Por tal motivo, se presentan en la Figura 7.23 las curvas pérdida de peso-tiempo para los hormigones elaborados con a-c) AFRs graníticos y b-d) AFRs cuarcíticos, de relación 0,40 a-b) y 0,55 c-d).

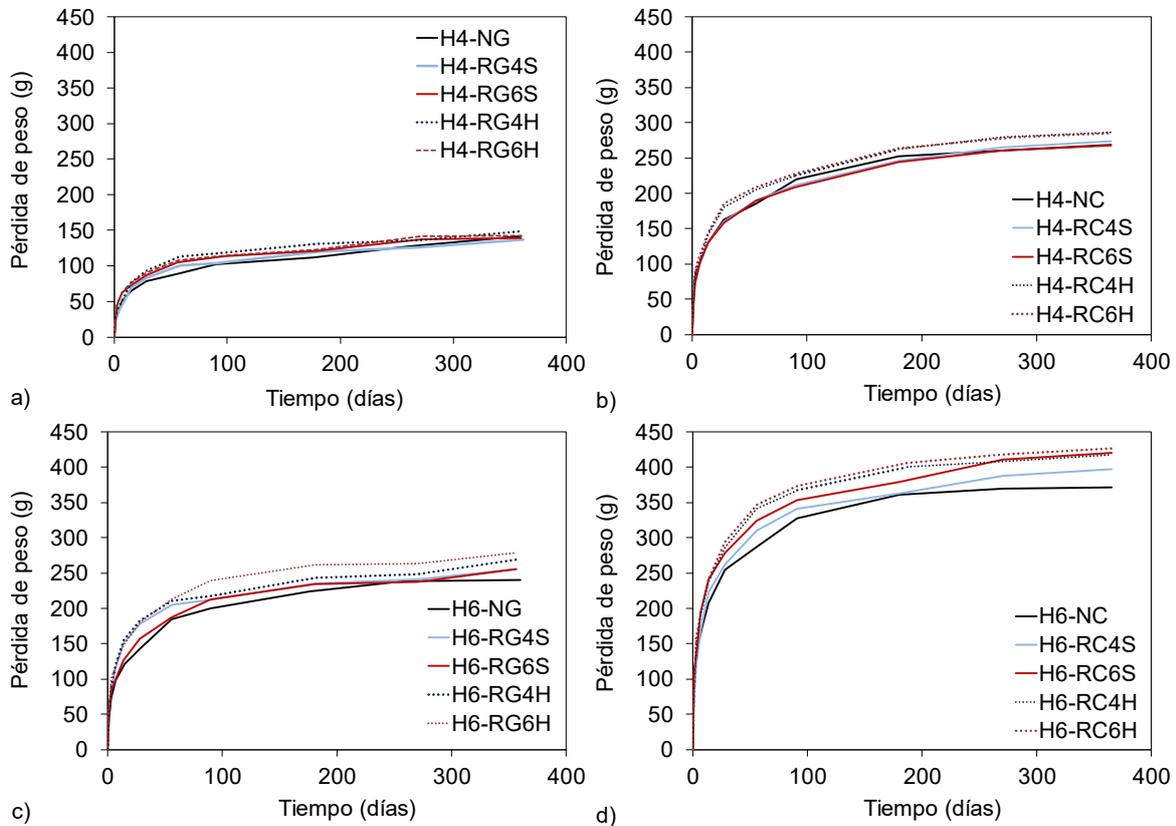


Figura 7.23. Pérdida de peso de los hormigones patrones y reciclados de relación a/c a-b) 0,40 y c-d) 0,55, elaborados con agregados a-c) graníticos y b-d) cuarcíticos

Se observa en la Figura que los hormigones en los que se emplearon agregados cuarcíticos presentan una mayor pérdida de peso que aquellos elaborados con agregados graníticos, lo cual puede deberse a que estos últimos hormigones presentan un contenido de agua entre un 10 y 15% menor.

Es de notar que en los hormigones reciclados de relación a/c 0,40 la pérdida de peso resulta mayor que en el correspondiente hormigón patrón sólo en aquellos casos en que se compensó la absorción de los AFRs. En tanto que cuando dicha compensación no fue realizada la pérdida de peso resulta similar respecto del patrón. Este hecho es más notorio en los hormigones con cuarcita y casi imperceptible en los elaborados con granito.

Contrariamente, en los hormigones de relación a/c 0,55 la pérdida de peso resulta mayor en los hormigones reciclados respecto del patrón aun cuando no se adicionó al agua

de mezclado la cantidad correspondiente a la absorción de los AFRS. Cabe mencionar que en dichos casos la cantidad de agua neta utilizada coincide con la empleada en el patrón en el caso de los hormigones graníticos y resulta algo menor (1%) en los hormigones con agregados cuarcíticos.

Respecto a las variables bajo análisis, no se observa influencia del nivel resistente del hormigón de origen del AFR. Independientemente de ello, los hormigones reciclados con una misma metodología para considerar la absorción de los AFRs exhibieron curvas de pérdidas de peso similares entre sí.

Contrariamente, la pérdida de peso de los hormigones se incrementa en aquellos casos en que se adicionó al agua de mezclado la absorción del AFR respecto de los hormigones en que dicha metodología no fue utilizada. La mayor pérdida de peso, para una misma edad, podría deberse a una mayor porosidad de los hormigones (lo que implica un mayor contenido de agua dentro de la masa del hormigón) o bien a un grado de secado mayor para una misma edad considerada.

Al respecto, en la Figura 7.24 se presenta la relación entre la pérdida de peso a distintas edades y la porosidad de los hormigones bajo estudio.

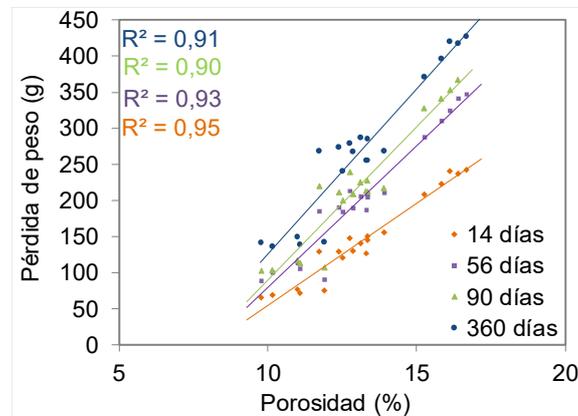


Figura 7.24. Relación entre la pérdida de peso a diferentes edades y la porosidad en los hormigones bajo estudio

Se observa una buena correlación entre la pérdida de peso y la porosidad de los hormigones para las diferentes edades evaluadas. Consecuentemente, la pérdida de peso se incrementa conforme lo hace la porosidad. Ello resulta evidente al considerar que una mayor porosidad representa un mayor contenido de agua en la masa de hormigón. Otro hecho notorio es que la pendiente de la curva se incrementa significativamente con el incremento de la edad a la cual es evaluada.

Un mayor contenido de agua en la masa del hormigón no necesariamente es perjudicial para la contracción por secado, sino que dependerá de la forma en que la misma sea liberada al ambiente. En tal sentido, si se analiza la pérdida de peso relativa a la pérdida total de cada hormigón en función de la raíz cuadrada del tiempo (en escala logarítmica), los puntos se alinean según una recta cuya pendiente resultaría un indicador de la velocidad con la que el agua se pierde de la masa de hormigón.

En las Figura 7.25 y 7.26 se presentan las curvas de los hormigones de relación a/c 0,40 y 0,55 respectivamente, elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos. Se observa en las figuras una muy buena correlación ($R^2 > 0,97$) para todos los hormigones bajo estudio. La pendiente de la recta resulta similar en los hormigones patrones y reciclados.

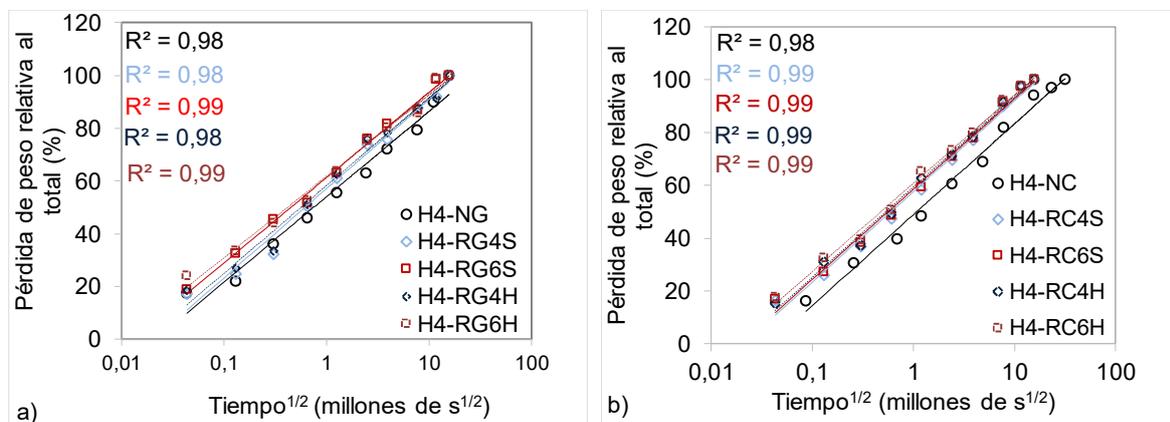


Figura 7.25. Relación entre la pérdida de peso y la raíz cuadrada del tiempo para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

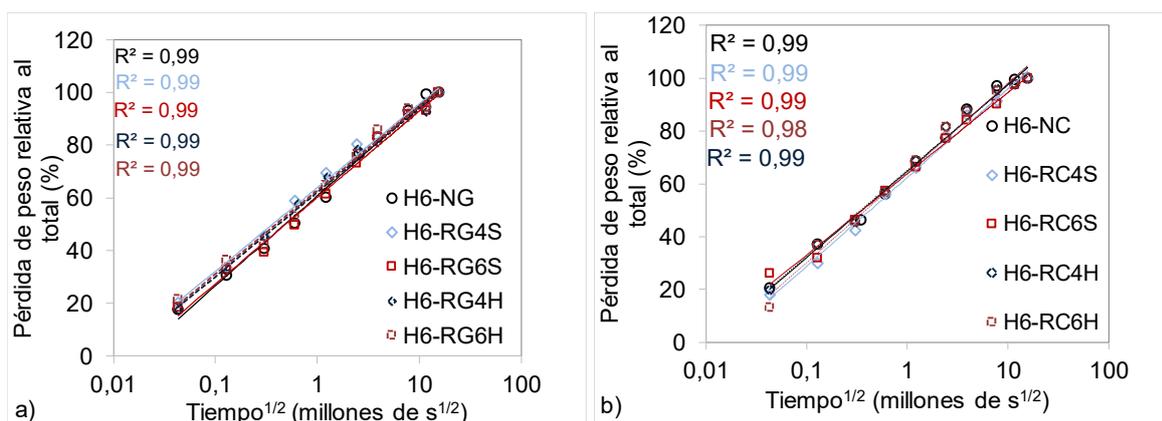


Figura 7.26. Relación entre la pérdida de peso y la raíz cuadrada del tiempo para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

La similitud en las pendientes indicaría que el mecanismo de pérdida de agua es similar en hormigones patrones y reciclados. Sin embargo y en función de los resultados obtenidos al evaluar la contracción por secado, resulta de interés práctico determinar la pérdida de peso dividiendo el tiempo en dos intervalos distintos. El primer intervalo comprende desde el inicio del estacionamiento hasta los 56 días, y luego desde los 56 días hasta los 365 días. Dichas curvas se presentan en el Anexo II. Las pendientes de la recta de regresión para los distintos intervalos evaluados se presentan también en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Pendiente de la recta de ajuste de la relación entre la pérdida de peso y la raíz cuadrada del tiempo

Hormigón	Pendiente de la recta de regresión			Hormigón	Pendiente de la recta de regresión		
	Edad de evaluación				Edad de evaluación		
	1-365	1-56	56-365		1-365	1-56	56-365
H4-NG	14,04	12,09	19,88	H4-NC	14,92	13,14	16,30
H4-RG4S	14,68	14,41	14,51	H4-RC4S	14,92	13,41	16,75
H4-RG6S	14,02	14,50	14,20	H4-RC6S	14,86	13,53	16,29
H4-RG4H	14,43	13,66	14,51	H4-RC4H	14,84	14,05	15,83
H4-RG6H	13,40	12,57	15,48	H4-RC6H	14,50	14,00	14,92
H6-NG	14,84	14,00	13,63	H6-NC	14,24	14,10	12,00
H6-RG4S	13,75	15,22	10,54	H6-RC4S	14,59	15,02	11,40
H6-RG6S	14,25	13,34	13,18	H6-RC6S	13,36	13,26	12,17
H6-RG4H	13,89	15,21	11,39	H6-RC4H	14,15	15,03	9,73
H6-RG6H	13,81	13,33	11,64	H6-RC6H	14,75	16,31	9,97

Surge de la Tabla 7.4 que al considerar la curva integralmente (1-365 días), las pendientes indican que no existen mayores diferencias en la velocidad con que se transfiere el agua desde la masa de hormigón al ambiente, a excepción de los hormigones graníticos de relación a/c 0,55.

Sin embargo, al tomar los coeficientes parciales la pendiente de la recta de ajuste presenta notorias diferencias respecto de considerar la curva de manera integral (1-365

días). En tal sentido, al analizar el intervalo 1-56 días para los hormigones graníticos de relación a/c 0,40, el secado se produce más rápidamente en los hormigones reciclados que en los correspondientes patrones, es decir, el agua en los grandes capilares se libera con mayor velocidad al ambiente. Este hecho se encuentra en concordancia con el mayor incremento en la contracción observado al evaluar la curva contracción-tiempo en escala logarítmica. Similares resultados se observan en los hormigones con agregados cuarcíticos de relación a/c 0,40 y 0,55.

Contrariamente, en los hormigones graníticos de relación a/c 0,55 las pendientes obtenidas no indican una tendencia clara. Para los hormigones elaborados con el agregado RG4 el coeficiente resultó mayor que el del correspondiente patrón, en tanto que en aquellos en que se empleó el agregado RG6 las pendientes resultan menores.

Al analizar las pendientes obtenidas para el intervalo 56-365 días de los hormigones elaborados con agregados graníticos, se observa que para las dos relaciones a/c evaluadas los coeficientes indican una mayor velocidad de secado en los hormigones patrones respecto de los reciclados.

Similares resultados se obtuvieron en los hormigones cuarcíticos de relación a/c 0,40 cuando se compensó la absorción de los AFRs. Contrariamente, cuando dicha compensación no fue realizada, como así también en los hormigones cuarcíticos de relación a/c 0,55, la pendiente obtenida indica una mayor velocidad de secado en los hormigones patrones.

Estas diferencias encontradas al analizar la curva en intervalos a diferentes edades indican con claridad que el fenómeno de transferencia de agua desde la masa de hormigón hacia el ambiente resulta modificado al emplear AFRs. Es posible que la porosidad de los mismos sea la responsable de estos cambios debido a que podrían cambiar los procesos de difusión dentro de la masa de hormigón. Sin embargo, para corroborar dicha hipótesis deberían llevarse a cabo estudios que monitoreen la humedad dentro de la masa de hormigón, la difusión de agua, la presión de vapor en los poros y la zona de interfaz pasta-AFR.

7.3.5 Relación pérdida de agua-contracción por secado

Como fuera discutido en el Capítulo 2, la remoción de agua de la masa del hormigón es la causa por la cual se genera el fenómeno de contracción por secado. Los mecanismos

que producen tal contracción se encuentran a su vez relacionados con la humedad relativa ambiente. En el rango de las humedades relativas estudiadas en la presente tesis ($50 \pm 2\%$), la contracción ocurre cuando el agua que se encuentra en los poros capilares y bajo la influencia de la tensión capilar (Mehta 1986) se transfiere al ambiente. En conformidad con lo indicado por Mindess y Young (1981), la pendiente de la curva contracción-pérdida de peso relativo (en porcentaje del peso inicial) puede ser asociada con el mecanismo por el cual se produce este fenómeno de contracción.

Así, en un primer tramo de dicha curva, una gran pérdida de peso es acompañada por pequeños incrementos de la contracción y el agua perdida corresponde al agua que se encuentra en los poros capilares grandes y medios. En el segundo tramo el mecanismo predominante también es la tensión capilar, pero en este se produce como consecuencia de la pérdida de agua en los poros capilares de pequeño tamaño. Esta modificación en la forma de la curva se debe a que cuanto menor sea el tamaño de poro la fuerza capilar es mayor y consecuentemente la pérdida del agua en su interior induce mayor contracción. En el tramo final de la curva se observa una gran pérdida de peso con pequeña a nula contracción, lo cual se produce como consecuencia de la tensión de desunión (disjoining pressure), que es el mecanismo predominante para humedades por debajo del 45% en donde la tensión por absorción no puede producirse debido a la inestabilidad de los meniscos de agua.

El análisis de la contracción en función de la pérdida de peso relativa al peso al inicio del estacionamiento en cámara seca se presenta en la Figura 7.27 para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos.

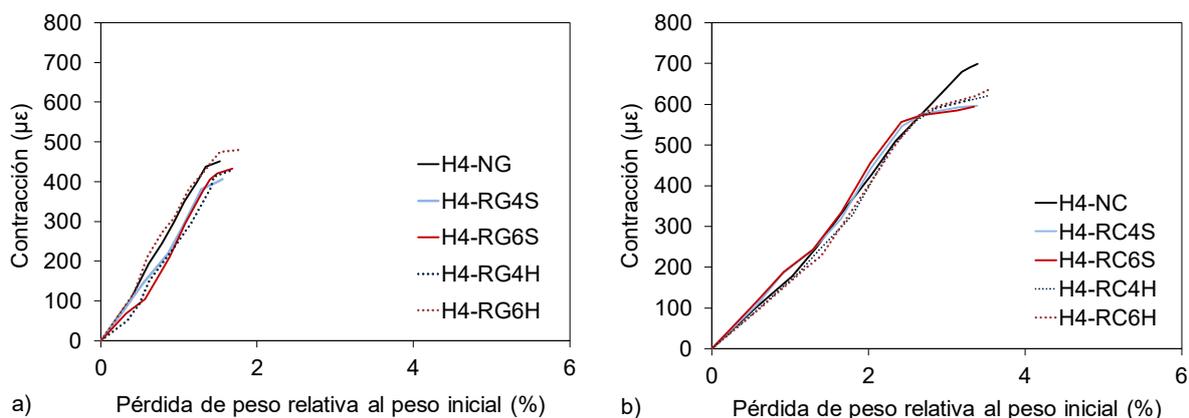


Figura 7.27. Contracción por secado en función de la pérdida de peso relativa para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Surge de la figura que el primer tramo reportado en la bibliografía (Mindess y Young 1981) en el que la contracción se incrementa levemente con una gran pérdida de peso no se observa en los hormigones bajo estudio. En tal sentido, sólo un cambio de pendiente se observa hacia el tramo final de la curva. Este cambio de pendiente resulta en un leve incremento de la contracción con una gran pérdida de peso. Asimilando estos resultados respecto de lo reportado en la bibliografía, en este tramo la tensión de desunión resultaría el mecanismo predominante de la contracción.

En los hormigones elaborados con agregados graníticos se observa que la pérdida de peso es significativamente mayor en los hormigones reciclados para un mismo nivel de contracción que el patrón, a excepción del hormigón H4-RG6H. Estos resultados se encuentran en línea con los coeficientes de secado obtenidos al relacionar la pérdida de peso con la raíz cuadrada del tiempo. La mayor pérdida de peso obtenida, sin embargo, no refleja en una mayor pendiente de las curvas, sino que las mismas resultan similares para los hormigones patrones y reciclados. Podría ocurrir entonces que parte del agua que se pierde se encontraba dentro de los poros del agregado (producto del curado húmedo al que son sometidas las muestras) y no en los poros capilares de la pasta de cemento. Consecuentemente, la pérdida de la misma no generaría una contracción adicional. Es de notar que la retención de agua por parte de los agregados ha sido reportada previamente en la literatura (Lima y Leite 2012).

En los hormigones elaborados con agregados cuarcíticos, previo al cambio de pendiente de las curvas, se observa en los reciclados una similitud en los valores de contracción y la pérdida de peso. Este hecho nuevamente se encuentra en línea con la similitud en los coeficientes reportados al evaluar la contracción en función de la raíz cuadrada del tiempo. En adición, resulta notorio que el cambio en la pendiente de los hormigones reciclados se presenta para una pérdida de peso sustancialmente menor en los mismos respecto del patrón. El efecto de retención de agua por parte de los AFRs no resulta evidente en los hormigones reciclados. Sin embargo, cabe mencionar que el agregado grueso natural tiene una absorción del 2,66% y por lo tanto el efecto de retención de agua por parte del mismo tendría una influencia mayor que el que se genera por el empleo del AFR.

Respecto de las variables bajo estudio, para ambos hormigones ninguna tendencia clara surge respecto del nivel resistente del hormigón de origen o la forma en que se compensó la absorción.

En la Figura 7.28 se presenta la contracción en función de la pérdida de peso relativa al peso al inicio del estacionamiento en cámara seca para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos.

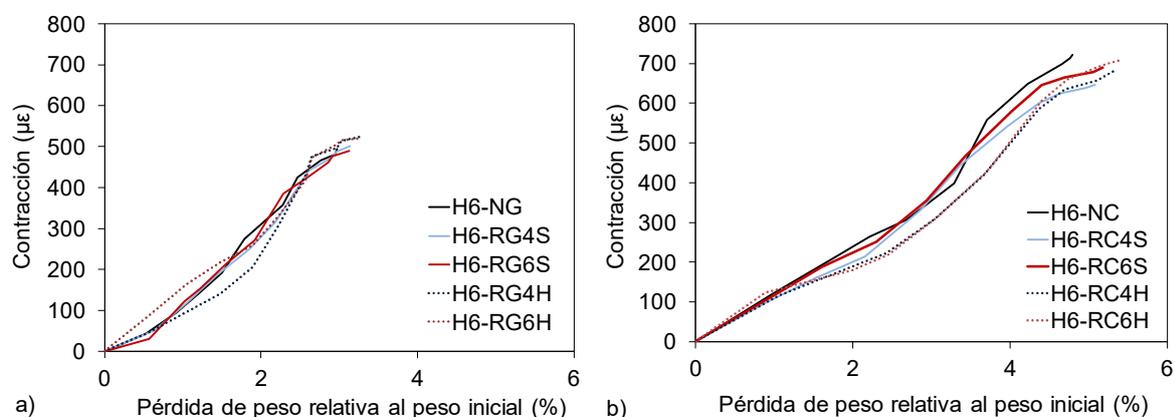


Figura 7.28. Contracción por secado en función de la pérdida de peso relativa para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados a) graníticos y b) cuarcíticos

Al igual que para los hormigones de relación a/c 0,40, el primer tramo de la curva indicado en la bibliografía (Mindess y Young 1981) parece sólo presentarse en el hormigón H6-RG6S, en tanto que en los restantes hormigones no resulta distinguible.

En los hormigones con AFRs graníticos se observan ligeras diferencias en las curvas respecto de la correspondiente al hormigón patrón. No obstante, a partir de la pérdida de peso correspondiente al 2%, en términos generales se evidencia una gran similitud en las curvas. Las ligeras diferencias encontradas para las pérdidas de peso menores al 2% resultan en concordancia con las diferencias encontradas al analizar los mecanismos de secado en los hormigones reciclados.

En los hormigones cuarcíticos se observa que la pendiente de la curva resulta similar para el hormigón patrón y aquellos en que no se compensó la absorción del agregado, mientras que cuando la misma fue considerada, la pendiente en el primer tramo de la curva resulta algo menor que en el correspondiente patrón. Se observa además que para un mismo nivel de contracción la pérdida de peso fue similar entre el patrón y los hormigones reciclados en que no se compensó la absorción del AFR y mayor en aquellos en que dicha compensación fue realizada.

Otro hecho notable en la figura es que en el hormigón patrón como en aquellos hormigones reciclados en que no se consideró la absorción del AFR, el cambio de

pendiente en la curva no resulta visible. Contrariamente, en aquellos hormigones reciclados en que se adicionó al agua de mezclado la correspondiente a la absorción de los AFRs la curva contracción-pérdida de peso presentó en una menor pendiente al inicio.

Respecto de las variables bajo estudio, ninguna tendencia clara surge respecto de la incidencia del nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs sobre la variación de la contracción en función de la pérdida de peso relativa. La forma en que se compensó la absorción resulta en diferencias solo en los hormigones cuarcíticos. Por tal motivo, no es posible establecer una tendencia definida respecto de la forma en que se consideró la absorción de los AFRs.

7.4 Estimación de la contracción por secado

7.4.1 Introducción

Existen distintos modelos para estimar la contracción por secado de los hormigones elaborados con agregados naturales. Algunos de estos modelos basan la estimación en la resistencia media a compresión a la edad de 28 días, mientras que otros toman en cuenta parámetros de la dosificación y del estado fresco. En esta sección se estima la contracción por secado de los hormigones elaborados en base a los modelos ACI 209R y CEB 90. La elección de dichos modelos se basa en que son ampliamente usados y cada uno de ellos realiza diferentes consideraciones para estimar la contracción. Así, el método ACI tiene en cuenta algunos parámetros como el proporcionamiento de la mezcla en estado fresco, mientras que el método CEB 90 basa la estimación en la resistencia media a compresión a 28 días.

7.4.2 Método ACI 209 R-92

El método ACI 209R define a la contracción última como aquella que se obtiene cuando la curva contracción-peso se vuelve asintótica, y permite calcularla por medio de las ecuaciones 6.1 y 6.2.

$$(\epsilon_{sh})_t = (t / (f+t)) \cdot (\epsilon_{sh})_u \quad (\text{ec.6.1})$$

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 \cdot Y_{sh} \cdot 10^{-6} \quad (\text{ec.6.2})$$

Donde:

$(\epsilon_{sh})_u$ = Deformación última de contracción (μm)

$(\epsilon_{sh})_t$ = Deformación de contracción a cualquier edad

t = Tiempo desde el final del curado (días)

f= Constante en función de la forma y geometría del elemento (varía entre 35 y 55)

Y_{sh} es el valor acumulativo de coeficientes que tienen en cuenta las condiciones de curado, la humedad relativa, la relación volumen / superficie del elemento, el asentamiento, el porcentaje de agregado fino, el contenido de cemento y el de aire en función de la ecuación 6.3. Estos coeficientes permiten considerar las variaciones de los distintos parámetros en función de las condiciones estándar definidas por el método. Las ecuaciones que permiten calcular cada uno de dichos coeficientes y los valores que toman de acuerdo a lo indicado en el método se presentan en el Anexo II.

$$Y_{sh} = Y_{tc} \cdot Y_{HR} \cdot Y_{vs} \cdot Y_s \cdot Y_{\psi} \cdot Y_c \cdot Y_{\alpha} \quad (\text{ec.6.3})$$

7.4.3 Método CEB 90

Este método permite estimar la contracción última mediante las ecuaciones 6.4 a 6.7 tomando como principal variable la resistencia media del hormigón a 28 días. Los valores que toman cada uno de los coeficientes involucrados se presentan en el Anexo II.

$$\epsilon_{sh}(t-tc) = \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t-t^c) \quad (\text{ec.6.4})$$

$$\beta_s(t-tc)_{cs0} = \left[\frac{\frac{t-tc}{t1}}{350 \left(\left[\frac{v}{s} \right]_0^2 + \frac{(t-tc)}{t1} \right)} \right] 0.5 \quad (\text{ec.6.5})$$

$$\epsilon_s = [160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot (9-fcm/fcm_0)] \times 10^{-6} \quad (\text{ec.6.6})$$

$$\beta_{HR} = 1.55 \cdot [1 - (h/h_0)^3] \quad (\text{ec.6.7})$$

Donde:

ϵ_{sh} = Contracción por secado ($\mu\epsilon$)

(t-tc) = Tiempo en días a la cual el hormigón es evaluado

ϵ_{cs0} = Coeficiente básico de la contracción

$\beta_s(t-t_c)$ = Coeficiente que define la evolución temporal de la contracción

β_{sc} = Parámetro que considera el tipo de cemento, ($\beta_{sc}=5$)

f_{cm} = Resistencia media a 28 días (MPa)

f_{cm0} = Resistencia inicial (10 MPa);

v/s_0 = Relación volumen/superficie de referencia (50mm);

v/s = Relación volumen/superficie de la probeta (35mm)

t_1 = Tiempo inicial de lectura (1día).

h = Humedad relativa

h_0 = Humedad relativa inicial de la probeta (100%)

7.4.4 Estimación de la contracción en los hormigones bajo estudio

El valor de la contracción última medida experimentalmente y calculada con los métodos ACI 209R y CEB 90 para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados graníticos se presentan en la Figura 7.29.

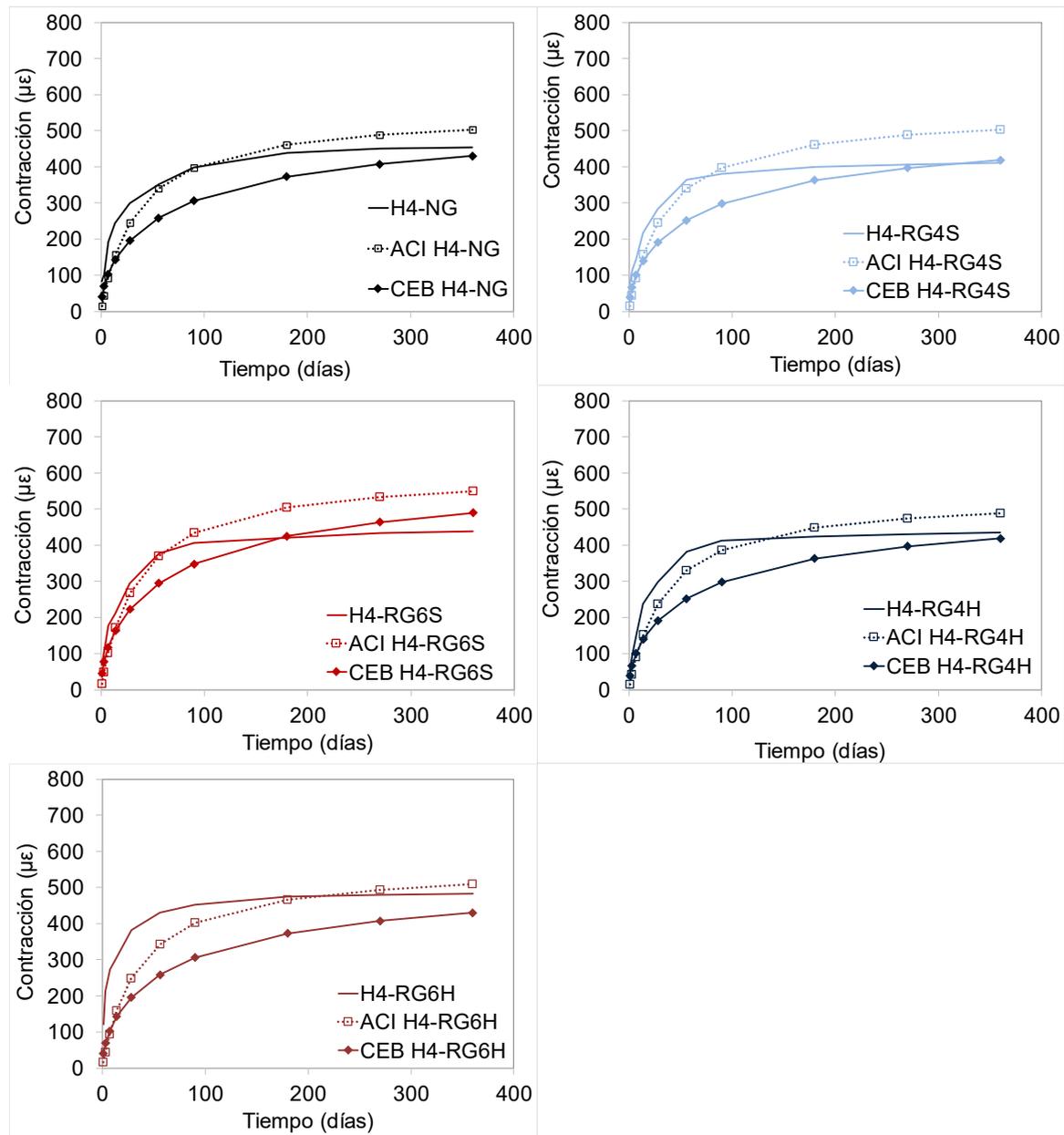


Figura 7.29. Comparación entre la contracción estimada y la medida experimentalmente para los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados graníticos

Puede observarse que la forma de las curvas experimentales presenta diferencias significativas respecto de las obtenidas mediante el método ACI 209R. En tal sentido, hasta

edades del orden de los 90 días la contracción experimental resulta mayor que la estimada. Transcurrida dicha edad en todos los hormigones la contracción experimental resulta menor que la estimada.

Al respecto, puede observarse que la contracción última determinada experimentalmente es entre 5% y 25% menor que la estimada. Además, puede apreciarse que las mayores diferencias se dan en los hormigones reciclados en que no se adicionó el agua de absorción de los AFRs.

Por otra parte, surge de la Figura que el método CEB 90 presenta mayores diferencias en la forma de las curvas en los hormigones graníticos que las obtenidas por el método ACI. No obstante, sorprendentemente los valores de contracción a 365 días resultan notoriamente similares a los obtenidos experimentalmente en dichos hormigones. En tal sentido, las mayores diferencias se presentan en los hormigones H4-RG6S y resultan del orden del 10%. En tanto que en los restantes hormigones las diferencias entre los valores experimentales y los estimados son menores al 6%.

El valor de la contracción última medida experimentalmente y calculada mediante los dos métodos indicados para los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con agregados cuarcíticos se presentan en la Figura 7.30. Puede observarse que la contracción medida resulta significativamente mayor que la estimada mediante el método ACI, en contraposición a lo sucedido para los hormigones graníticos de igual relación a/c. Las diferencias entre los valores experimentales y los calculados se encuentran entre 12 y 25%. Es de notar que la mayor diferencia obtenida (25%) se da en el hormigón patrón.

Cuando se realiza la estimación de la contracción por el método CEB 90 se obtienen valores muy por debajo de los determinados experimentalmente y los calculados por el método ACI.

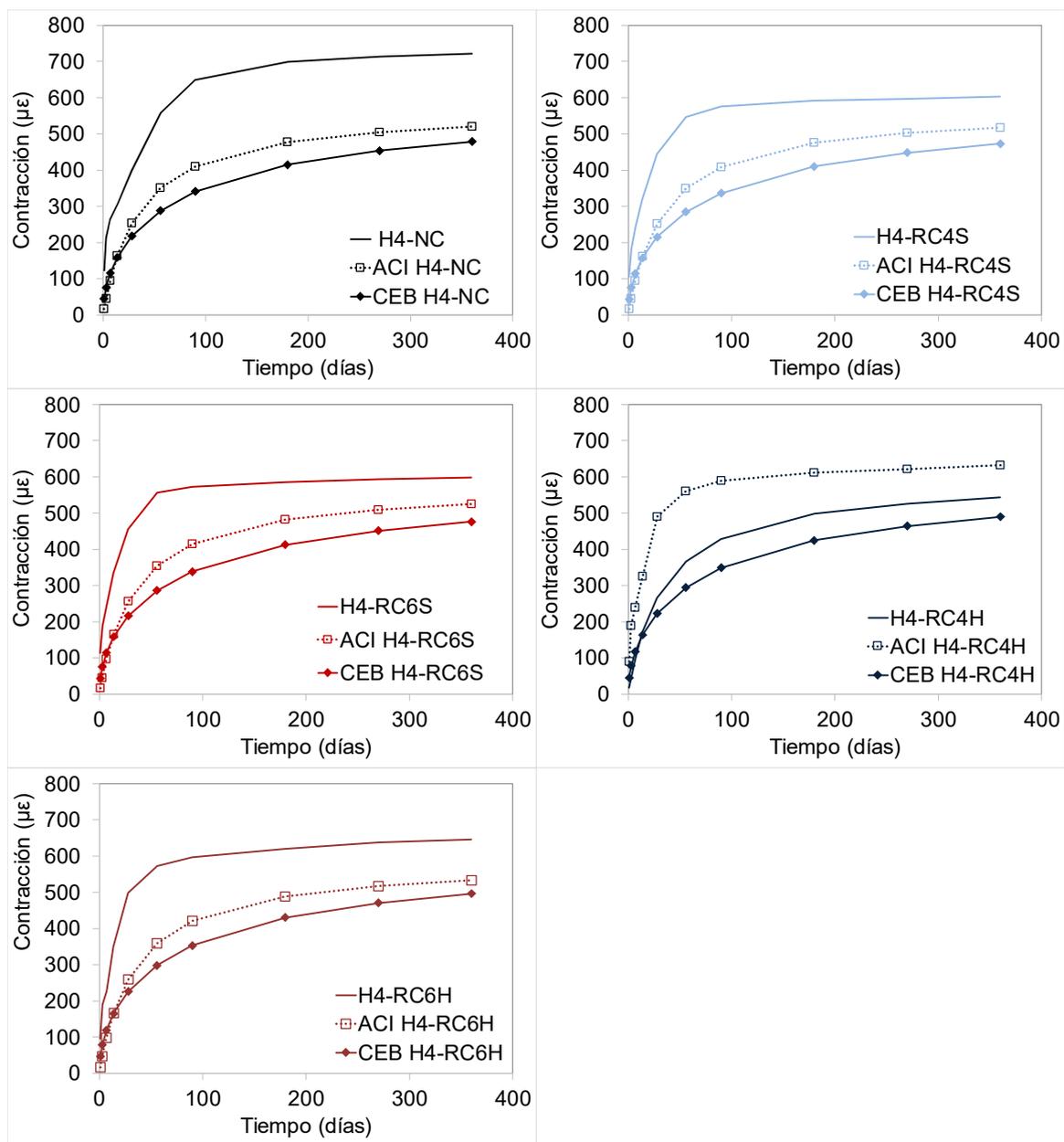


Figura 7.30. Comparación entre la contracción estimada y la medida experimentalmente para los hormigones de relación a/c 0,40 con agregados cuarcíticos

El valor de la contracción última medida experimentalmente y calculada mediante los dos métodos indicados para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados graníticos se presentan en la Figura 7.31. Nuevamente se observa que la estimación mediante el método CEB 90 proporciona valores significativamente cercanos a los obtenidos experimentalmente, encontrándose diferencias menores al 3% a pesar de las grandes diferencias obtenidas en la forma que presentan las curvas. En tanto que con el método ACI las diferencias se encuentran entre el 2 y el 17%.

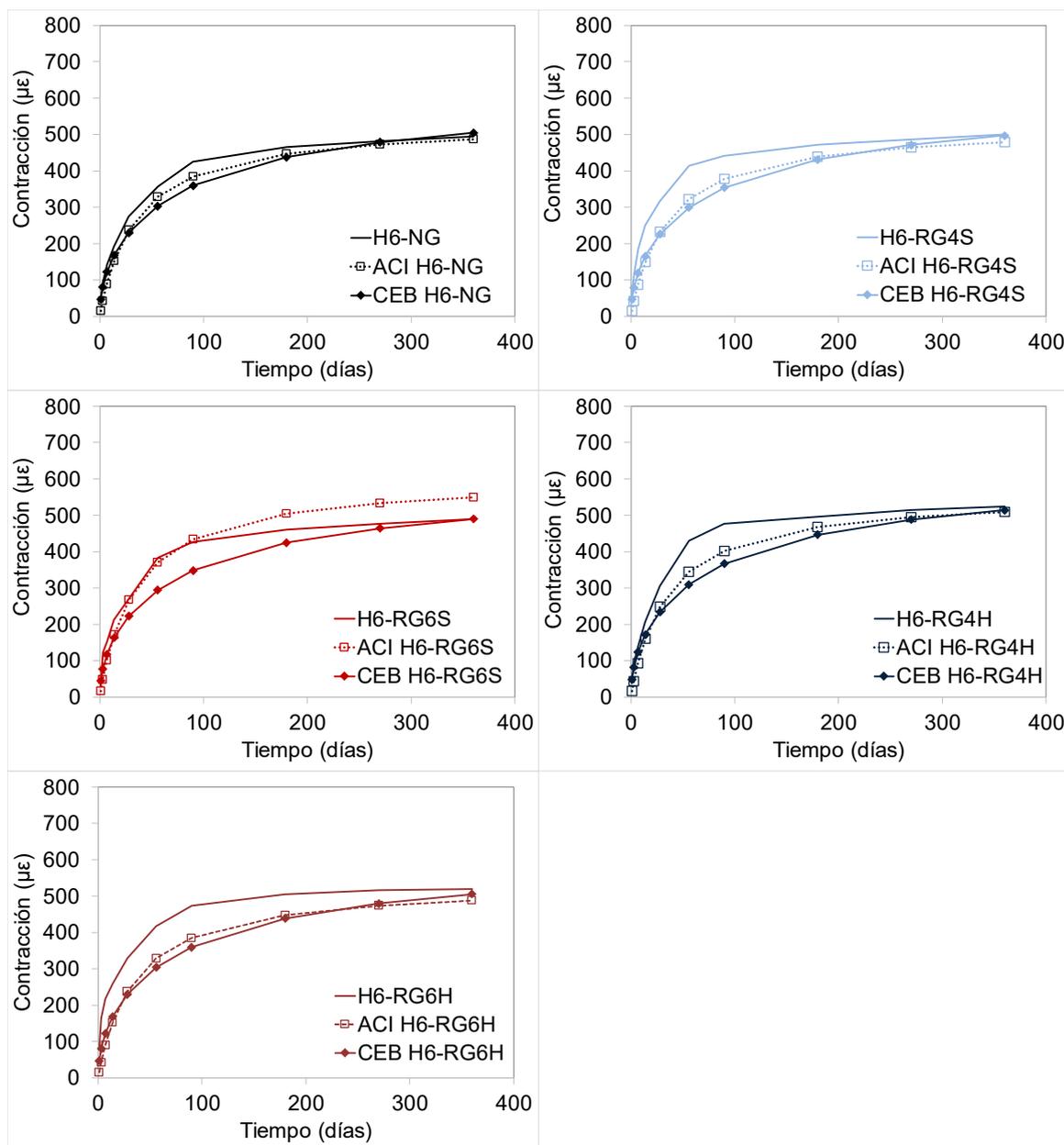


Figura 7.31. Comparación entre la contracción estimada y la medida experimentalmente para los hormigones de relación a/c 0,55 con agregados graníticos

El valor de la contracción última medida experimentalmente y calculada mediante los dos métodos indicados para los hormigones de relación a/c 0,55 elaborados con agregados cuarcíticos se presentan en la Figura 7.32. Puede notarse que los valores estimados por ambos métodos resultan significativamente menores que la obtenida experimentalmente. Las diferencias se encuentran entre 15 y 30% para la estimación mediante el método CEB 90 y entre 20 y 32% para el método ACI.

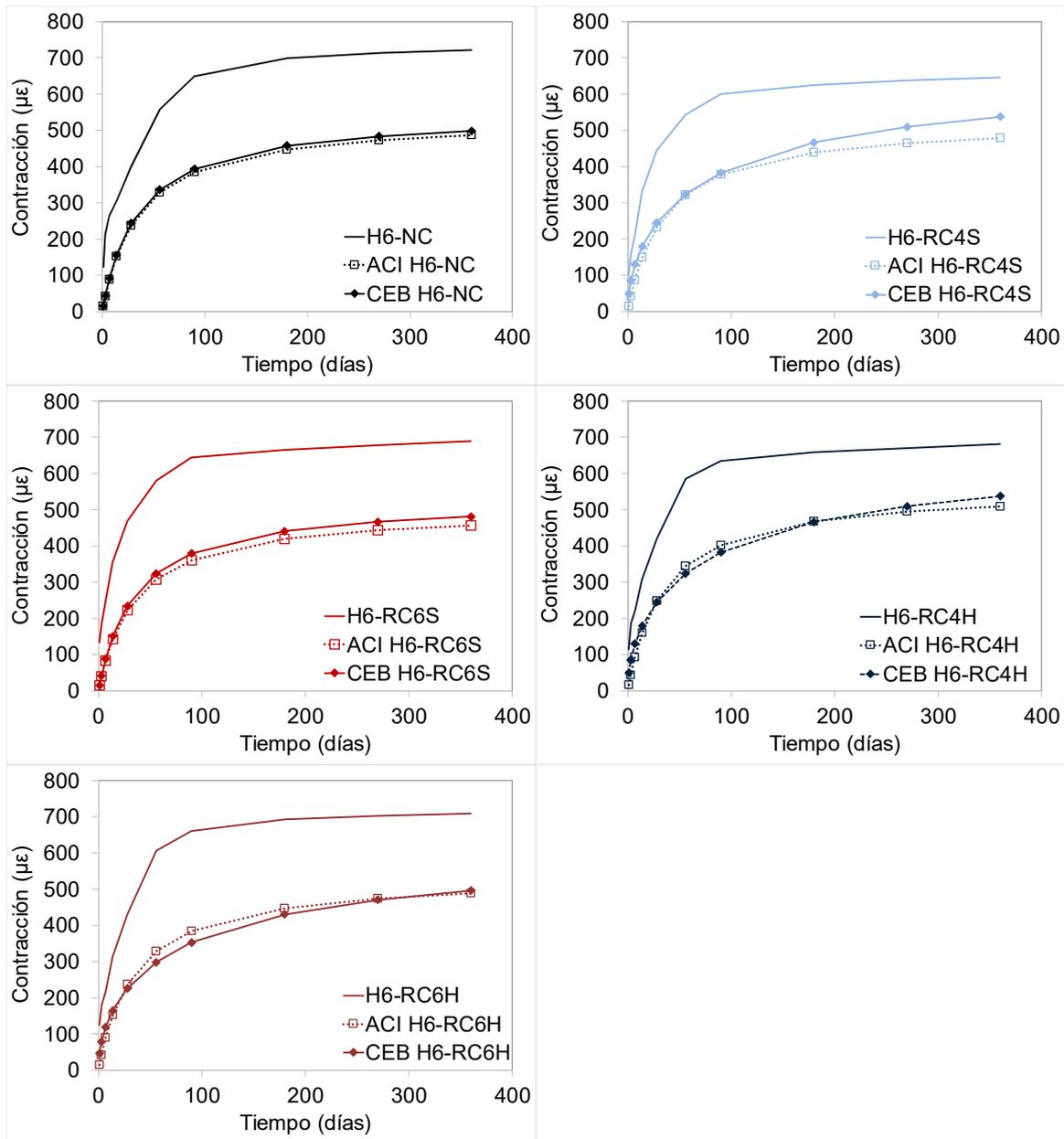


Figura 7.32. Comparación entre la contracción estimada y la medida experimentalmente para los hormigones de relación a/c 0,55 con agregados cuarcíticos

De los resultados obtenidos mediante ambos métodos, en comparación con los valores hallados experimentalmente, resulta claro que el método CEB 90 es un muy buen indicador de la contracción por secado a 365 días en los hormigones graníticos, independientemente de la relación a/c considerada y de las variables bajo estudio. Este hecho resulta un hallazgo importante ya que supone que el empleo de AFRs no representa una variable que invalide el empleo de modelos predictivos del comportamiento en contracción.

Contrariamente, en los hormigones con agregados cuarcíticos la contracción experimental resultó entre 15% y 30 % mayor que las estimaciones realizadas por ambos métodos. Un hecho no menor es que al observar las diferencias obtenidas no surge un comportamiento diferencial en función del empleo de los AFRs. Es decir que en dichos hormigones las diferencias en la estimación de la contracción resultan en una subestimación de similar magnitud en los hormigones patrones y reciclados.

7.5 Relaciones entre propiedades

La influencia de la relación a/c es señalada como una de las características del hormigón que determina en gran medida la contracción por secado (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1986). En la Figura 7.33 se presenta la relación entre la contracción por secado a 365 días y la razón a/c a) total y b) efectiva.

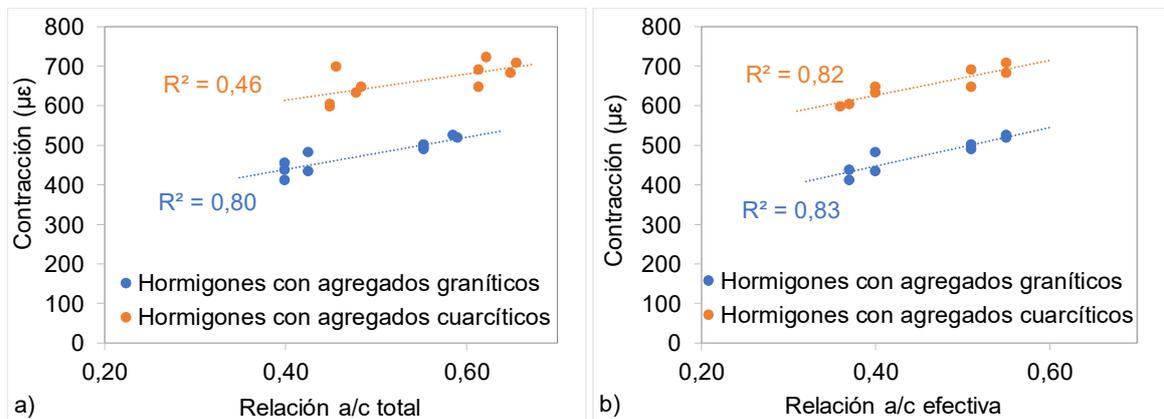


Figura 7.33. Relación entre la contracción por secado y la razón a/c a) total y b) efectiva

Puede observarse en la Figura que, si bien el ajuste no es bueno, pareciera existir una tendencia al incremento en la contracción con el aumento de la relación a/c. Se observa además que los ajustes obtenidos no presentan un cambio significativo al considerar la relación a/c total respecto de la efectiva. La falta de una relación clara entre la relación a/c y la contracción por secado podría deberse a que dicha relación adquiere una pendiente distinta al emplear AFRs. En tal sentido, en la Figura 7.34 se presentan las mismas relaciones pero considerando solamente a los hormigones reciclados.

Los coeficientes de correlación mejoran respecto de cuando los patrones fueron considerados, principalmente en el caso de los hormigones cuarcíticos. No obstante, el ajuste sigue sin resultar bueno para ambos tipos de agregados.

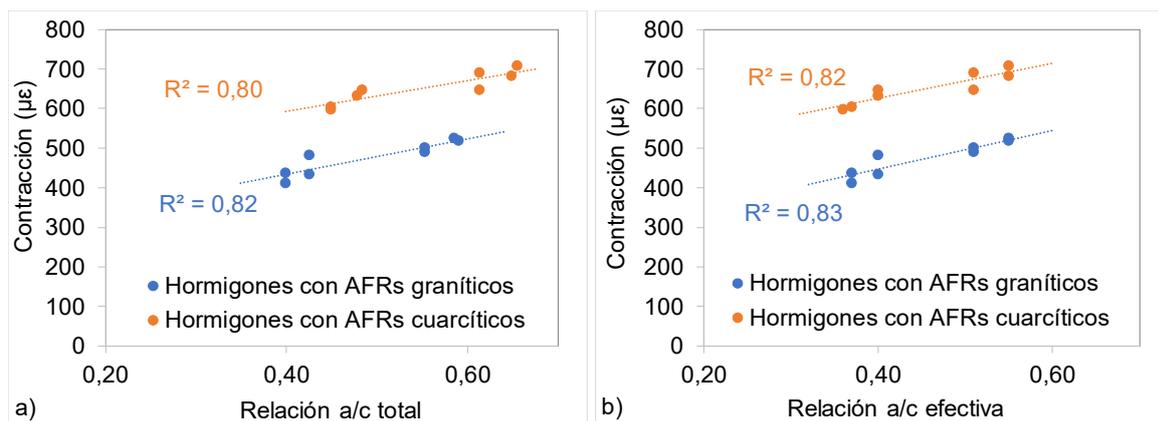


Figura 7.34 Relación entre la contracción de los hormigones reciclados y la razón a/c a) total y b) efectiva

Un hecho notable en la Figura 7.34 es que, al considerar la relación a/c total, el ajuste obtenido resulta ligeramente menor al obtenido al considerar la relación a/c efectiva. Este hecho contrasta con los resultados obtenidos en la evaluación de otras propiedades frente a la razón a/c total y efectiva (Ver Capítulo 5). En tal sentido, propiedades tales como la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la velocidad de succión capilar presentaron una muy buena correlación con la relación a/c total y una correlación nula con la efectiva. No obstante, los puntos se encuentran distribuidos en los extremos de la recta de ajuste. Por dicha razón el buen ajuste obtenido no puede considerarse concluyente.

La relación entre la cantidad de agua total en los hormigones y la contracción por secado se presenta en la Figura 7.35 considerando a) los hormigones patrones y reciclados y b) sólo hormigones reciclados. Surge de la Figura que al considerar los hormigones patrones y reciclados la contracción se incrementa conforme lo hace el contenido neto de agua. No obstante, un buen ajuste se obtuvo en los hormigones con agregados graníticos. Cuando sólo se consideran los hormigones reciclados el ajuste resulta bueno para ambos tipos de agregados utilizados. La mejora que se evidencia en los coeficientes de correlación podría deberse a que en los hormigones patrones la relación entre el contenido de agua y la contracción presente una relación diferente que en los hormigones reciclados.

Por otra parte, puede observarse que la pendiente de la recta de ajuste es similar en ambos tipos de hormigones reciclados elaborados. Ello podría indicar que la relación entre la contracción por secado y el contenido de agua total resulta en una relación lineal independiente de la mineralogía del agregado en el hormigón de origen.

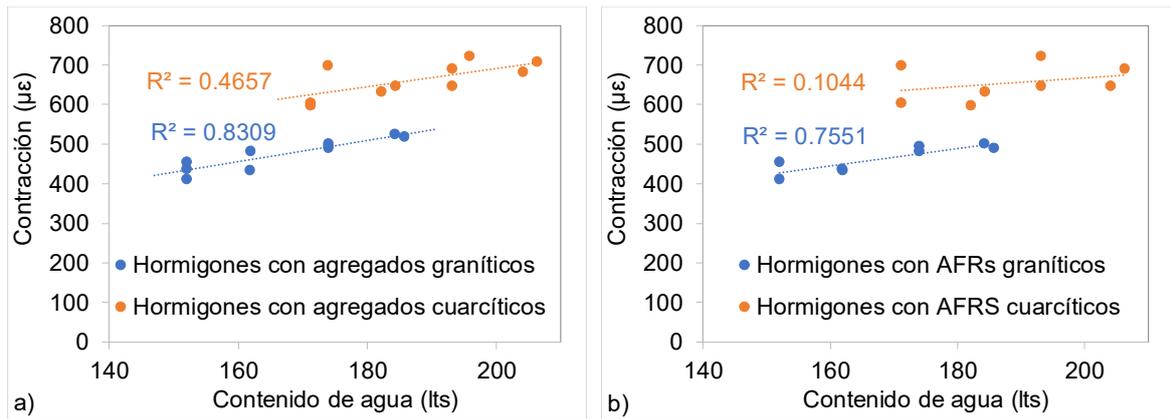


Figura 7.35. Relación entre la contracción y el contenido de agua total para los hormigones a) patrones y reciclados y b) sólo reciclados

La relación entre la resistencia a compresión y la contracción por secado se presenta en la Figura 7.36, considerando a) hormigones patrones y reciclados y b) sólo hormigones reciclados. Puede observarse que, nuevamente, al considerar patrones y reciclados el ajuste no es bueno. Al considerar sólo hormigones reciclados mejora sensiblemente, siendo bueno sólo para los hormigones cuarcíticos. No obstante, una clara tendencia a disminuir la contracción al incrementarse la resistencia a compresión se observa en ambos tipos de hormigones. Esta tendencia se encuentra en coincidencia con lo reportado para hormigones convencionales (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1986).

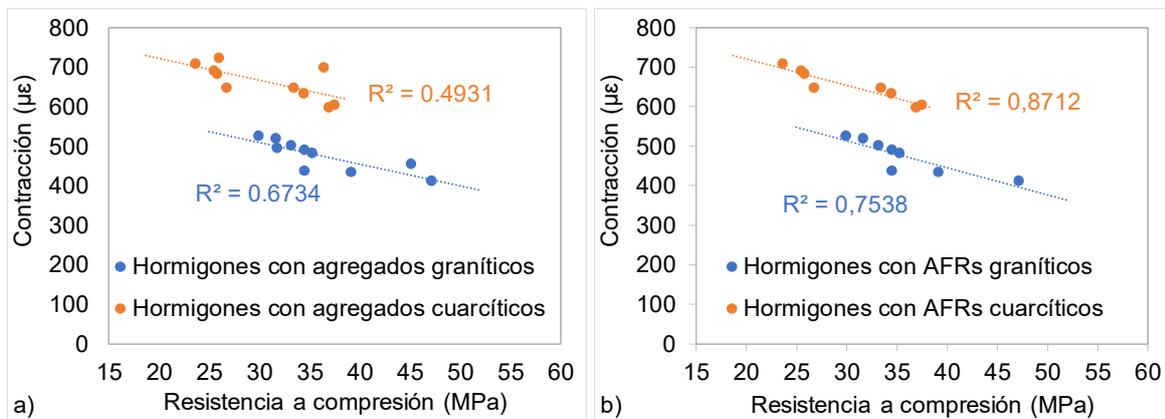


Figura 7.36. Relación entre la contracción por secado y la resistencia a compresión de los hormigones a) patrones y reciclados y b) sólo reciclados

Como fuera indicado anteriormente, el módulo de elasticidad del agregado grueso es indicado como uno de los principales factores que influyen en la contracción por secado del hormigón, por ser quien restringe la contracción de la pasta de cemento (Neville 1975, Mehta y Monteiro 1986). En tal sentido, cuanto mayor sea la rigidez del mismo, mayor será el módulo del hormigón elaborado a partir de él. Análogamente podría postularse que,

cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del hormigón menor será la contracción que este posea. En la Figura 7.37 se presenta la relación entre el módulo de elasticidad a 28 días y la contracción por secado última considerando a) hormigones patrones y reciclados y b) sólo hormigones reciclados.

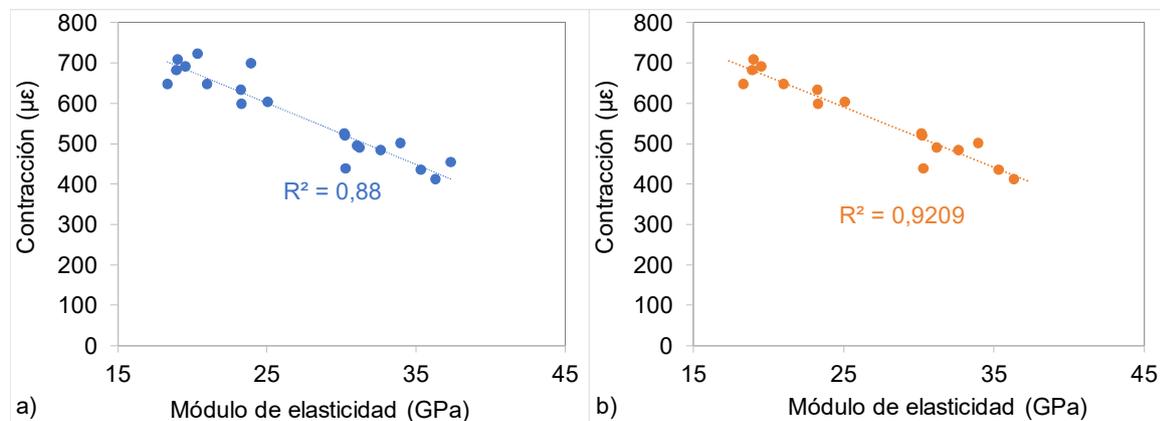


Figura 7.37. Relación entre la contracción por secado y el módulo de elasticidad considerando a) hormigones patrones y reciclados y b) sólo hormigones reciclados

Surge de la Figura que el ajuste resulta bueno en ambos casos. Este hecho implica que el módulo de elasticidad, independientemente del tipo de agregado utilizado en el hormigón y la relación a/c del mismo, guardan una relación lineal con la contracción por secado.

7.6 Relación entre la contracción a diferentes edades

Como fuera mencionado en distintos pasajes del presente capítulo, la contracción que se produce a 90 días corresponde hasta un 80% de la contracción esperable a 20 años (Neville 1975). Zhang et al (2013) sugieren que la contracción a la edad de 90 días puede ser utilizada para estimar la contracción esperable a edades avanzadas. En tal sentido, la evaluación hasta dicha edad representaría un beneficio por cuanto la edad última de evaluación podría reducirse significativamente.

Se presenta entonces, en la Figura 7.38, la relación entre la contracción a 365 días respecto a la obtenida a 90 días para todos los hormigones bajo estudio. Surge de la figura un muy buen ajuste para la relación existente entre ambas. Si se toma la pendiente de la curva de ajuste como el coeficiente de corrección de la contracción respecto a la obtenida a los 90 días, surge que el nivel de contracción a esta edad y a la edad de 365 días resultan semejantes (coef = 1.03) Ello implica que podrían acortarse los tiempos de ensayos a 90

días para estimar de manera fiable y sin mayores diferencias la contracción esperable a 365 días.

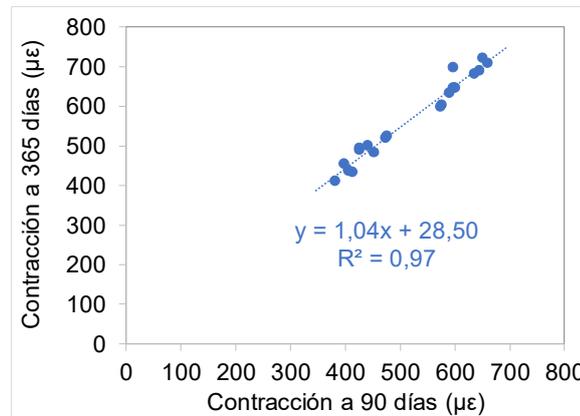


Figura 7.38. Relación entre la contracción a 90 días y a 365 días

7.7 Relación entre morteros y hormigones

En la Figura 7.39 se presenta la contracción última determinada en los hormigones en función de la obtenida en los morteros. Resulta notorio que, pese a que la correlación no es buena, una clara tendencia al incremento de la contracción en los hormigones se produce con el incremento de la contracción en los morteros.

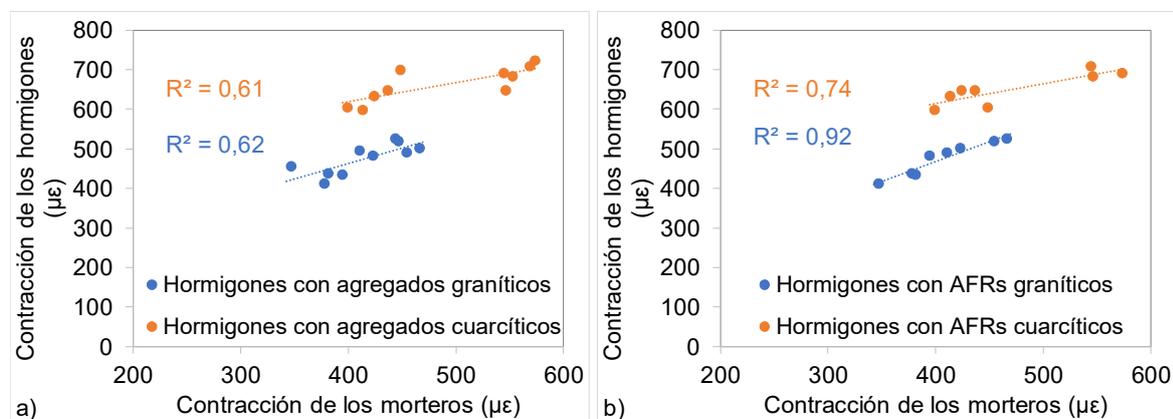


Figura 7.39. Relación entre la contracción de morteros y hormigones considerando a) agregados finos naturales y reciclados y b) sólo agregados finos reciclados

Surge de la figura una tendencia incremental con buen ajuste entre la contracción de morteros y hormigones. No obstante, el comportamiento de la contracción en morteros no representa a priori un indicador de la influencia que los AFRs ejercerán en tal propiedad en hormigones. En tal sentido se observó que los AFRs poseen una influencia mayor en los morteros que en los hormigones. Este comportamiento coincide con lo reportado en la

bibliografía (Zhang et al 2013). La justificación a este comportamiento puede encontrarse en la mayor influencia que presentan los agregados finos en los morteros producto de la mayor proporción que presentan en la dosificación

En tal sentido, para los morteros graníticos de relación a/c 0,40 se observó un incremento de la contracción entre 10% y 20% al emplear AFRs, mientras que en los hormigones se obtuvieron contracciones semejantes a la del patrón. En los morteros de relación a/c 0,55 las diferencias respecto del patrón fueron del 10% en tanto que similares contracciones fueron observadas en hormigones patrones y reciclados.

En los morteros con agregados cuarcíticos reciclados la contracción por secado fue entre 2% y 10% menor en los de relación a/c 0,40 y similares al patrón en la relación a/c 0,55. En tanto que en los hormigones la menor contracción frente al patrón fue de entre 10% y 15% para la relación a/c 0,40 y entre 5% y 10% para los de razón a/c 0,55.

Las diferencias observadas entre morteros y hormigones podrían deberse a la superposición de dos efectos distintos: la presencia del agregado grueso en hormigones y el tamaño de la muestra. En tal sentido en la bibliografía el tamaño del espécimen ha sido señalado como un factor de gran influencia en la contracción por secado (Hansen y Mattock 1996, Hobbs y Mears 1971, Imamoto 2008, Seiui 2010)

En la bibliografía (Zhang et al 2013) se ha reportado que la gran influencia del agregado grueso sobre la contracción por secado podría mitigar el efecto que producen los agregados finos. Tal hecho resulta en coincidencia con lo observado en los hormigones en los que se emplearon AFRs graníticos. Al respecto, la mayor contracción en los morteros respecto del patrón resultó claramente atenuada en los hormigones, obteniéndose valores similares en la contracción de patrones y reciclados. Contrariamente, en los morteros con agregados cuarcíticos se observó una ligera disminución en la contracción respecto del patrón, mientras que en los hormigones dicha disminución resultó más relevante. El comportamiento contrapuesto en cuanto a la relación entre la contracción en morteros y hormigones en función del tipo de AFRs considerado (granítico o cuarcítico) contrasta con lo reportado en la bibliografía. Consecuentemente, es posible que las diferencias obtenidas no se deban a la presencia del agregado grueso.

Por otra parte, como fuera mencionado, el tamaño de la muestra podría ser responsable de las diferencias observadas entre morteros y hormigones. Al respecto, la

velocidad con la que se produce la pérdida de agua se incrementa conforme disminuye el tamaño del espécimen (Şener et al 2009, Ba et al 2013), por lo que es esperable entonces una gran diferencia debido a ello.

En adición a lo tratado en el párrafo precedente, en la velocidad de secado la relación superficie/volumen del espécimen resulta en una variable de primer orden. En el caso de los morteros dicha relación es de 35mm mientras que en los hormigones es de 50mm. Estos cambios podrían influenciar los procesos de difusión acelerando el secado de las probetas al tener un menor recorrido hacia la superficie.

Como fuera analizado en la sección 6.3.4, el empleo del AFR causa modificaciones en la velocidad de secado respecto de la obtenida en los hormigones patrones. Dichos cambios no quedaron de manifiesto en los morteros. Es posible entonces, que el menor tamaño de las probetas utilizadas en los morteros mitigue el efecto de los cambios en el secado al emplear AFRs, y consecuentemente produzcan el comportamiento diferencial observado entre morteros y hormigones.

7.8 Conclusiones

De los resultados obtenidos en la evaluación de la contracción por secado y la pérdida de peso en los morteros y hormigones bajo estudio, las siguientes conclusiones pudieron obtenerse:

En morteros:

- En los morteros de relación agua/cemento 0,40 elaborados con AFRs graníticos la contracción por secado se incrementó entre el 10% y 20% respecto del mortero patrón. En los elaborados con AFRs cuarcíticos de igual razón a/c la contracción disminuyó hasta en un 10%.
- En los morteros de relación a/c 0,55 la contracción resultó de similar magnitud en los elaborados con AFRs cuarcíticos y ligeramente superior en aquellos con AFR graníticos, en comparación con los correspondientes morteros patrones.
- El nivel resistente del hormigón de origen no resultó ser una influencia significativa sobre la contracción por secado de los morteros reciclados. Sin embargo, una ligera

tendencia al incremento de la contracción en correspondencia con el menor nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs se observó en los morteros de relación a/c 0,40.

- La influencia de la mineralogía del agregado en el hormigón que da origen a los AFRs podría depender de la relación a/c de los morteros elaborados. En tal sentido, una influencia menor se observó en los morteros de relación a/c 0,40 respecto de los de 0,55.
- Un ligero aumento en la contracción se produjo al adicionar al agua de mezclado la correspondiente a la absorción de los AFRs, respecto de cuando dicha metodología no fue implementada. No obstante debido a las mínimas diferencias observadas dicha variable no resultó significativa.
- Las diferencias entre propiedades tales como la absorción, la forma y textura superficial entre los AFRs y los AFTs de referencia podrían determinar la influencia que el empleo de AFRs ejerce sobre la contracción por secado más que la mineralogía o nivel resistente de hormigón del cual provienen los AFRs.
- Hasta la edad de 56 días la contracción por secado de los morteros reciclados presentó grandes diferencias respecto de la observada en los morteros patrones. Para edades mayores de evaluación la contracción resulta similar o ligeramente mayor en los morteros en los que se empleó AFR.
- La pérdida de peso que experimentaron los morteros reciclados fueron mayores que en los patrones, aun cuando la cantidad de agua utilizada en su elaboración fue igual o menor que la empleada en el patrón. Adicionalmente, en términos generales, se observó que para un mismo nivel de contracción la pérdida de peso en los morteros reciclados resultó sustancialmente mayor que en los patrones.
- La mayor pérdida de peso de los morteros con AFRs podría obedecer a la retención de agua por parte de los mismos. En tal sentido, una buena correlación entre la pérdida de peso y la porosidad de los morteros se obtuvo en los morteros elaborados con agregados graníticos, aunque no así en los morteros con agregados cuarcíticos.
- Al relacionar la variación del peso de los morteros bajo estudio respecto de la raíz cuadrada del tiempo se obtuvieron coeficientes que permiten interpretar el mecanismo de transferencia del agua desde la masa de mortero al medio. Tales coeficientes indicaron

claras diferencias en los mecanismos de transferencia de agua al ambiente, principalmente en las primeras edades de evaluación.

- Las curvas contracción en función de la pérdida de peso no mostraron un comportamiento único respecto de la influencia que el empleo del AFR ejerce sobre la contracción. Sin embargo, las diferencias encontradas en las pendientes de las curvas ponen de manifiesto que el fenómeno de contracción difiere significativamente en los morteros patrones y reciclados.
- La mayor pérdida de peso de los morteros reciclados, contrariamente a lo esperable, no se manifestó en un mayor nivel de contracción respecto del patrón. Tal comportamiento es atribuido a la presencia de agua en los poros internos del AFRs, la cual al perderse no generaría una contracción adicional.
- La contracción de los morteros guarda una relación lineal con la porosidad de los mismos, independientemente del tipo de agregado considerado. En tal sentido, la contracción se incrementa linealmente con el incremento en la porosidad de los morteros.

En hormigones:

- Los hormigones graníticos presentaron un nivel de contracción última significativamente mayor que aquellos en que se emplearon agregados cuarcíticos. Dichas diferencias se deben al módulo de elasticidad del agregado grueso utilizado en cada caso.
- La contracción por secado de los hormigones de relación a/c 0,40 elaborados con AFRs graníticos resultó de similar magnitud que la del patrón. En los elaborados con AFRs cuarcíticos se observaron disminuciones entre 10 y 15% respecto de los hormigones patrones.
- Al igual que en los morteros, el nivel resistente del hormigón de origen no ejerció una influencia significativa sobre la contracción por secado de los hormigones elaborados. No obstante, una contracción ligeramente mayor se obtuvo en los hormigones elaborados con los AFRs proveniente del hormigón de menor nivel resistente.
- La incorporación del agua de absorción de los AFRs produjo un incremento del 10% en la contracción por secado en comparación a cuando dicha metodología no fue contemplada.

- La contracción a primeras edades (entre 1 y 14 días) resultó menor en los hormigones reciclados de relación a/c 0,40 respecto del patrón. En tanto que en los hormigones de relación a/c 0,55 dicho comportamiento se invierte.
- Para edades de entre los 14 y los 56 días la contracción por secado se incrementa con mayor magnitud respecto del patrón en los hormigones de relación a/c 0,40. Sin embargo en los hormigones patrones dicho incremento se prolonga hasta edades más avanzadas. Por lo cual el incremento de la contracción entre los 56 y los 365 días resulta mayor en los hormigones patrones.
- La compensación de la absorción de los AFRs ejerció una influencia significativa sobre la contracción en los hormigones de mayor relación a/c. No obstante, las diferencias entre los hormigones en que se compensó la absorción y en aquellos en que no se realizó resultan de una magnitud poco relevante.
- La relación entre la contracción de hormigones patrones y reciclados se ajusta según una recta cuya pendiente puede ser empleada como coeficiente para estimar la contracción de hormigones reciclados a partir de hormigones convencionales con análoga dosificación. Los coeficientes que presentaron los hormigones bajo estudio indican un mismo nivel de contracción para hormigones patrones y reciclados.
- En el análisis de la pérdida de peso de los hormigones se observó un comportamiento diferencial según la relación a/c del hormigón elaborado. Para los de relación a/c 0,40 la pérdida de peso fue mayor solo cuando se compensó la absorción de los AFRs, en tanto que en los de razón a/c 0,55 los hormigones reciclados presentaron una mayor pérdida de peso que sus correspondientes patrones.
- Se encontró una buena correlación entre la pérdida de peso y la porosidad de los hormigones, donde un aumento de esta última generó un incremento proporcional en la pérdida de peso.
- Un buen indicador del comportamiento en contracción de los hormigones resultó la pendiente de la recta de ajuste obtenida al relacionar la pérdida de peso con la raíz cuadrada del tiempo en escala logarítmica. Dicho indicador evidenció cambios significativos en los mecanismos de transferencia de agua desde el interior del hormigón al ambiente al emplear AFRs. Estudios específicos de monitoreo de humedad, procesos de difusión y

presión de vapor de agua en los poros del hormigón deberían llevarse a cabo para comprobar dicha hipótesis.

- Las curvas contracción-pérdida de peso de los hormigones indican, en términos generales, que para un mismo nivel de contracción la pérdida de peso es mayor en los hormigones reciclados. Esto podría explicarse a partir de considerar que el agua se encontraba retenida en los poros del agregado y por lo tanto al perderse no generó una contracción adicional.
- Los modelos predictivos de la contracción por secado mostraron un nivel similar de estimación en los hormigones patrones y reciclados. En tal sentido, valores muy cercanos a los experimentales se obtuvieron mediante el método CEB 90 en los hormigones con agregados graníticos. En los elaborados con agregados cuarcíticos la estimación resultó en valores de hasta un 30% por debajo de los obtenidos experimentalmente, tanto por el método CEB 90 como por el ACI.
- La relación entre la contracción por secado y la razón a/c no mostro un buen nivel de correlación. Sin embargo, una clara tendencia al incremento de la contracción conforme se incrementó la relación a/c fue observada.
- La relación entre la contracción por secado y la cantidad de agua total empleada en el hormigón exhibió un buen ajuste sólo en los hormigones con agregados graníticos. No obstante, una tendencia incremental entre la contracción y la cantidad de agua neta empleada en la elaboración se observó para los hormigones con ambos tipos de agregados.
- La contracción por secado exhibió una tendencia a incrementarse conforme disminuye la resistencia a compresión. Sin embargo, la correlación obtenida no resultó buena.
- La contracción por secado muestra una relación inversamente proporcional con el módulo de elasticidad de los hormigones, independientemente de la mineralogía del agregado y la relación a/c evaluada.
- La contracción a 90 días resulta del mismo orden de magnitud que la obtenida a 365 días en todos los hormigones en estudio. Es posible entonces, considerar la contracción última a los 90 días y reducir considerablemente los tiempos indicados en la normativa nacional.

- El comportamiento en contracción que exhibieron los morteros no refleja ningún tipo de correlación con aquellos obtenidos en los hormigones. Las diferencias obtenidas ponen de manifiesto que la influencia del tamaño del espécimen no permite una comparación directa entre ambos.

Conclusiones

El presente trabajo de tesis contribuye al conocimiento de las propiedades de los agregados finos reciclados (AFR) y la influencia que los mismos ejercen sobre distintas propiedades del estado fresco y endurecido de morteros y hormigones en los que fueron empleados, haciendo foco especialmente en la contracción por secado. Los estudios se realizaron sobre cuatro AFRs obtenidos a partir de la trituración de hormigones de dos relaciones a/c (0,40 y 0,55), elaborados con dos mineralogías de agregado natural (granítica y cuarcítica), en los que se empleó 30% (en volumen) de agregado fino de trituración (AFT). Dichos AFRs fueron empleados en reemplazo de los AFTs en la elaboración de morteros y hormigones considerando las mismas relaciones a/c anteriormente mencionadas..

A fin de considerar la alta absorción de los AFRs, en la dosificación de las mezclas se consideraron dos metodologías de trabajo. En una de ellas se supuso que el agregado absorbe el 80% de su capacidad de absorción a 24 horas, motivo por el cual se adicionó al agua de mezclado la cantidad correspondiente a dicha tasa de absorción. La otra metodología consistió en no realizar aporte de agua adicional, basados en la consideración que el agregado no es capaz de absorber agua durante al mezclado debido al efecto sellador que podría tener el ligante (Neville 1975). Los resultados obtenidos han permitido definir en qué medida las propiedades del hormigón de origen influyen las propiedades de los AFRs producidos, como así también las modificaciones que pueden provocar sobre las propiedades de los hormigones con ellos elaborados.

Se informan a continuación las conclusiones generales del presente trabajo de tesis y se sugieren posibles estudios futuros a fin de contribuir al avance del conocimiento sobre distintas propiedades que presentan morteros y hormigones cuando se emplean AFRs en su elaboración.

8.1 Propiedades de los agregados finos reciclados

➤ Los agregados finos reciclados (AFRs), debido a la pasta de cemento en su composición, presentaron menor densidad y durabilidad y mayor absorción que los agregados finos naturales (AFNs) considerados.

- El proceso de trituración por el que se obtuvieron los AFRs ejerció una influencia mayor sobre la granulometría que el nivel resistente y/o la mineralogía del agregado en el hormigón de origen. Este mismo proceso es el responsable de la alta angularidad que mostraron los AFRs. En cuanto a la forma y textura superficial ninguna tendencia clara se observó en función del nivel resistente del hormigón de origen. Los AFRs cuarcíticos presentaron una mayor cubicidad que los graníticos.
- Las propiedades físicas habitualmente determinadas en los AFNs tales como distribución granulométrica, densidad y material menor a 75 μm no resultaron suficientes para establecer a priori la calidad de los AFRs. En tal sentido, los mismos presentaron pequeñas variaciones en dichas propiedades independientemente del nivel resistente y de la mineralogía del agregado utilizado en el hormigón de origen. Contrariamente, la porosidad y la durabilidad frente al ataque por sulfato de sodio de los AFRs resultaron sensibles al nivel resistente del hormigón del cual provienen.
- En contraposición a lo indicado en la bibliografía, la determinación gravimétrica del contenido de pasta en los AFRs no resultó ser un buen indicador de su calidad, ni puede ser relacionado en forma directa con ninguna propiedad física de los mismos. En tal sentido, se observó una influencia mayor de la calidad de la pasta por sobre el contenido de la misma. La estimación de la calidad relativa de la pasta (a través del cálculo de la porosidad capilar) entre distintos AFRs puede realizarse a partir del modelo de Powers (1949) sólo si la dosificación del hormigón de origen es conocida.
- La absorción de los AFRs es la propiedad que más diferencia presentó frente a los AFNs. La utilización de distintos métodos para su determinación condujo a resultados significativamente diferentes en la valoración de dicha propiedad. En tal sentido, sería necesario contar con un método único y fehaciente para su determinación, más aún cuando esta propiedad determina el contenido de agua a adicionar en el proporcionamiento de las mezclas cuando los agregados son utilizados con una humedad menor a la correspondiente a su estado de saturado y superficie seca, de acuerdo a los métodos de diseño tradicionales.

8.2 Propiedades de los morteros reciclados

- La consistencia de los morteros elaborados con AFRs graníticos fue mayor que la correspondiente a los morteros patrones, y similar o incluso menor cuando se utilizaron

AFRs cuarcíticos. Estas diferencias ponen de manifiesto que la forma y textura de las partículas del AFR, en comparación con las del AFN de referencia, podrían tener una influencia mayor en la consistencia de los morteros que la calidad, absorción e incluso la metodología empleada para compensar la absorción de los AFRs.

- El empleo de AFRs no ejerció una influencia significativa sobre el peso por unidad de volumen de los morteros, independientemente de la metodología empleada para considerar la absorción de los AFRs, el nivel resistente y la mineralogía del agregado en el hormigón de origen.
- El nivel resistente, la mineralogía del agregado en el hormigón de origen, así como la forma en que se consideró la absorción de los AFRs en la dosificación no resultaron variables determinantes respecto de la resistencia a compresión de los morteros elaborados. En todos los casos el nivel resistente de los morteros convencionales y reciclados resultó similar.
- La densidad de los morteros elaborados con AFRs resultó hasta un 3% menor que la obtenida en los correspondientes morteros patrones. Asimismo, ninguna tendencia clara entre las variables bajo estudio y dicha propiedad pudo ser establecida.
- La porosidad mostró un comportamiento diferencial en función de la relación a/c de los morteros elaborados. En los de relación a/c 0,40 la adición al agua de mezclado de la absorción de los AFRs causó incrementos en la porosidad respecto a cuando dicha metodología no fue empleada. En los morteros de relación a/c 0,55 se observó un incremento de la porosidad del 10% respecto al patrón, independientemente de las variables bajo análisis.
- El empleo de AFRs evidenció un comportamiento diferencial sobre la contracción por secado en función de la relación a/c de los morteros y la mineralogía del agregado empleado en el hormigón de origen. En los morteros de relación a/c 0,40 elaborados con AFRs graníticos la contracción por secado se incrementó entre el 10% y 20% respecto del mortero patrón. En los elaborados con AFRs cuarcíticos de igual razón a/c la contracción disminuyó hasta en un 10%. En los morteros de relación a/c 0,55 la contracción resultó de similar magnitud en los elaborados con AFRs cuarcíticos y ligeramente superior en aquellos con AFR graníticos, en comparación con los correspondientes morteros patrones.

- Una ligera tendencia al incremento de la contracción en correspondencia con el menor nivel resistente del hormigón de origen de los AFRs se observó en los morteros de relación a/c 0,40. Además, un leve aumento en la contracción se produjo al adicionar al agua de mezclado la correspondiente a la absorción de los AFRs respecto de cuando dicha metodología no fue implementada. No obstante, debido a las mínimas diferencias observadas, dicha variable no resulta significativa.
- Hasta la edad de 56 días la contracción por secado de los morteros reciclados presentó grandes diferencias respecto de la de los morteros patrones. Para edades mayores de evaluación, la contracción resultó similar o ligeramente mayor en los morteros en los que se empleó AFR. Dicho comportamiento debe ser atribuido a cambios en el secado de las probetas como consecuencia de diferencias en el proceso de difusión y a la retención de agua por parte de los AFRs.

8.3 Propiedades de los hormigones reciclados

- La consistencia de los hormigones reciclados evidenció un comportamiento diferencial en función de la mineralogía del agregado reciclado. Cuando se emplearon AFRs de tipo granítico (RG) se registró un aumento de la consistencia de los hormigones, mientras que cuando se utilizaron AFRs cuarcíticos (RC) se observó un mayor asentamiento en comparación con los hormigones patrones. La influencia del empleo de AFRs sobre la consistencia no resultó independiente de la relación a/c utilizada, exhibiendo una mayor influencia en los hormigones de menor relación a/c.
- La adición al agua de mezclado del 80% de la capacidad de absorción de los AFRs graníticos no resultó suficiente para obtener similar nivel de consistencia que en el hormigón patrón, por lo cual fue necesario utilizar mayores dosis de aditivo superfluidificante. Este hecho debe ser atribuido a la forma y textura de los AFRs en comparación con el AFRs de referencia.
- Otras propiedades del estado fresco como el peso por unidad de volumen, la velocidad y capacidad de exudación y el contenido de aire no pudieron relacionarse con ninguna de las variables planteadas en este estudio. Consecuentemente, el nivel resistente y la mineralogía del agregado en el hormigón de origen, como así también la metodología utilizada para considerar la absorción de los AFRs no resultaron tener una influencia significativa en las mencionadas propiedades del estado fresco.

- La resistencia a compresión de los hormigones exhibió una relación exponencial inversa con la razón a/c total, en tanto que ninguna tendencia pudo establecerse con la relación a/c potencial, aun cuando la misma fue calculada a partir de la absorción de los AFRs obtenida por tres métodos diferentes. Este hecho pone de manifiesto la falta de certeza sobre la tasa de absorción de los agregados en el proceso de mezclado y consecuentemente sobre la relación a/c potencial. La buena correlación obtenida entre la resistencia a compresión y la relación a/c total permite aseverar que al compensar la absorción de los AFRs parte del agua adicional no es absorbida por el agregado, quedando entonces como agua libre y modificando en consecuencia la relación a/c planteada. Pareciera por tanto una alternativa más eficiente el empleo de aditivos reductores de agua frente a la adición al agua de mezclado de la tasa de absorción planteada, a fin de evitar modificaciones en el estado fresco y endurecido.

- El nivel resistente del hormigón de origen del cual provienen los AFRs no mostró una tendencia definida respecto de su influencia sobre la resistencia a compresión del hormigón elaborado. Sólo los hormigones reciclados elaborados con el agregado RG6 presentaron disminuciones de la resistencia ligeramente mayores a la dispersión propia del ensayo. Desde un enfoque ingenieril, el empleo de 30% (en volumen) de AFR en la elaboración de hormigones no produce mermas en la resistencia a compresión que impidan su utilización. El empleo de AFRs no ejerció una influencia significativa en la resistencia a flexión. En los hormigones de razón a/c 0,40 se observaron mermas considerables sólo para el agregado RG6, en tanto que en los de razón a/c 0,55 no se registraron disminuciones significativas. No se observó una tendencia clara entre la resistencia a flexión y la relación a/c total y/o efectiva, lo cual implica una influencia mayor de otras variables inherentes al empleo de AFRs tales como su forma y textura superficial.

- Las propiedades durables de los hormigones reciclados resultaron más deficientes que las del correspondiente hormigón de referencia. Sin embargo, pudo relacionarse de manera directa la relación a/c total con las propiedades durables evaluadas. En tal sentido, parte de las diferencias encontradas podrían atribuirse a la mayor relación a/c total que al propio empleo del AFR. Ese hecho encuentra sustento en la falta de tendencia entre las distintas propiedades evaluadas y la relación a/c efectiva, sumado a que esta última presenta una gran variabilidad en función del método por el cual se determinó la absorción de los AFRs.

- La mineralogía del agregado en el hormigón de origen influyó de manera diferencial en la contracción por secado. Al emplear AFRs graníticos la contracción resultó de similar magnitud que la del patrón, en tanto que el uso de AFRs cuarcíticos generó una disminución entre 10 y 15% de la obtenida en los hormigones patrones.
- El nivel resistente del hormigón de origen no ejerció una influencia significativa sobre la contracción por secado de los hormigones elaborados. Sin embargo, una contracción ligeramente mayor se obtuvo en los hormigones elaborados con los AFRs provenientes del hormigón de menor nivel resistente. Asimismo, la incorporación del agua de absorción de los AFRs produjo un incremento del 10% en la contracción por secado en comparación a cuando dicha metodología no fue implementada.
- La contracción por secado de los hormigones reciclados respecto al patrón parece depender de la edad de evaluación. Durante las primeras edades (entre 1 y 14 días) resultó similar o menor en los hormigones reciclados. Entre los 14 y los 56 días la contracción por secado se incrementó en mayor magnitud en los reciclados. Sin embargo, en los hormigones patrones la evolución de la contracción se prolongó por más tiempo que en los reciclados. Consecuentemente en todos los hormigones reciclados la contracción última resultó de similar magnitud o incluso inferior.
- La compensación de la absorción de los AFRs ejerció una pequeña influencia sobre la contracción sólo en los hormigones de relación a/c 0,55. Sin embargo, dada la mínima magnitud de las diferencias obtenidas, en términos prácticos puede indicarse que dicha metodología no resultó en una influencia significativa sobre la contracción por secado.
- La relación entre la contracción del hormigón patrón y aquellos en los que se emplearon AFRs presentó pendientes cercanas a la unidad en todos los casos. Dichos valores de las pendientes indican un mismo nivel de contracción para hormigones patrones y reciclados.
- Significativos cambios en los mecanismos de transferencia de agua al ambiente pudieron apreciarse entre hormigones patrones y reciclados al relacionar la pérdida de peso con la raíz cuadrada del tiempo en escala logarítmica. Estudios específicos de monitoreo de humedad, procesos de difusión y presión de vapor de agua en los poros del hormigón deberían llevarse a cabo para comprender las variables intervinientes.

- Los modelos predictivos considerados para estimar la contracción por secado no mostraron diferencias en su aptitud al emplear AFRs. En los hormigones graníticos la contracción última experimental y estimada resultaron similares, en tanto que en los hormigones cuarcíticos, en términos generales, las estimaciones resultaron significativamente menores que la contracción última experimental.
- Se obtuvo una buena correlación al relacionar el módulo de elasticidad de los hormigones patrones y reciclados con la contracción por secado. No fue posible obtener un buen ajuste al relacionar la contracción por secado con otras propiedades del hormigón tales como la resistencia a compresión, el contenido de agua y la relación a/c (total o efectiva).
- La contracción a 90 días resultó del mismo orden de magnitud que la obtenida a 365 días en todos los hormigones en estudio. Si bien los resultados resultan insuficientes para concluir al respecto, más estudios deberían realizarse por cuanto considerar la contracción última a los 90 días permitiría reducir considerablemente los tiempos indicados en la normativa nacional.
- El comportamiento en contracción que exhibieron los morteros no refleja la misma influencia que ejerció el empleo del AFR en hormigones. Las diferencias obtenidas ponen de manifiesto que el tamaño del espécimen analizado no permite una comparación directa.

8.4 Consideraciones Finales

Del análisis bibliográfico y de los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo de tesis surge que distintas cuestiones referentes a las propiedades de los agregados finos reciclados, así como la influencia que los mismos ejercen sobre las mezclas extensamente discutidos en la bibliografía sobre la temática, resultan al menos cuestionables.

En tal sentido la mayor parte de la literatura hace referencia al gran contenido de pasta adherida que presentan los AFRs y su vinculación con las propiedades físicas que los mismos presentan. Sin embargo, como pudiera concluirse de los estudios realizados, la metodología utilizada para determinar el contenido de pasta no aporta dato alguno sobre la calidad de los AFRs. Consecuentemente, la determinación de dicha característica resulta al menos cuestionable en cuanto a su interés práctico. Otras propiedades de los AFRs tales

como su porosidad o durabilidad frente al ataque por sulfato de sodio parecen tener relación con las características del hormigón de origen y, consecuentemente, estar vinculadas a la calidad del AFR.

Por otra parte, en la bibliografía sobre la temática se encuentra un gran rango de variación de la absorción de agua de los AFRs, sin que ella pueda relacionarse con el nivel resistente del hormigón del cual provienen. Tal variación en los resultados reportados ha sido atribuida a las diferentes características de los hormigones de origen. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la misma consideración podría realizarse en el caso de los agregados gruesos reciclados. No obstante, el rango de variación en los mismos es mucho más reducido que el reportado para los AFRs. Al respecto no existe un único método para determinar la absorción de agua en los AFRs, sino que tres métodos diferentes son los más utilizados a nivel internacional. En el presente estudio se realizó un análisis comparativo de los mismos, evidenciando diferencias de hasta un 226% en los valores de absorción obtenidos. Resulta claro entonces que el gran rango de valores reportados no sólo depende de las características del hormigón del cual provienen los AFRs, sino que también, y posiblemente en mayor magnitud, del método empleado en su determinación. Por lo tanto, es necesario establecer un único método que permita una determinación fehaciente de tal propiedad. Es de notar, que el desconocimiento de las características de los agregados a ser empleados en morteros y hormigones difícilmente conduzca a resultados satisfactorios respecto de las características deseadas en las mezclas a elaborar.

En adición a lo anteriormente tratado, especial atención debe tenerse respecto a la absorción de agua, por cuanto ella determina la cantidad de agua a adicionar cuando los agregados son utilizados en un estado de humedad menor al correspondiente al de saturado y superficie seca (sss). Resulta evidente que la sobrestimación de la absorción de los AFRs redundará en una mayor relación agua-cemento (a/c) de los hormigones reciclados. Adicionalmente, cuando las propiedades de los mismos son comparadas con las de hormigones convencionales no sólo se estará evaluando la influencia del AFR, sino que involuntariamente se estarán comparando hormigones de distintas relaciones a/c .

Debe considerarse además que la compensación del agua de absorción de los agregados es recomendada en distintas guías de diseño de mezclas de hormigones, tales como el ACI 211 (ACI 211 2009) y PCA (Kostmaka et al 2008). Sin embargo, no existen certezas sobre la cantidad real de agua que los agregados absorben durante el mezclado (si su condición de humedad es menor a la correspondiente al estado sss). Pudiera ocurrir,

tal como sugiere Neville (1975), que el cemento selle los poros de los agregados y no permita su saturación durante el mezclado. En tal caso, la relación a/c se vería modificada respecto de la planteada. Es de notar que evaluar comparativamente la influencia del empleo de AFRs sobre las propiedades de hormigones es posible sólo si la relación a/c efectiva es la misma en los hormigones de referencia y reciclados. En tal sentido la gran contradicción en la bibliografía sobre la influencia negativa del empleo de AFRs en hormigones podría ser una consecuencia de dicha comparación entre hormigones de distintas relaciones a/c. En concordancia con el análisis precedente, los resultados surgidos en este estudio parecen evidenciar tal situación a través de la correlación entre distintas propiedades del hormigón y la relación a/c total. Estas mismas relaciones no fueron observadas con la razón a/c potencial, aun cuando la misma se calculó con la absorción de agua de los AFRs obtenidas por tres métodos distintos. Pareciera oportuno entonces postular que la imposibilidad de determinar fehacientemente la absorción de los AFRs, y la incertidumbre respecto de la tasa de absorción de los mismos durante el mezclado, tornan desfavorable la comparación del desempeño entre hormigones convencionales y reciclados.

Otro hecho a destacar es el que resulta al considerar la consistencia de las mezclas en las que se emplearon AFRs. En una gran cantidad de estudios se concluye que la absorción de los AFRs genera una disminución significativa de la fluidez de las mezclas. Esta conclusión no resulta siempre adecuada por cuanto en una cantidad no menor de estos estudios se utiliza al agregado en estado sss o bien se adiciona el agua de absorción de los AFRs. Debe considerarse además que en alguno de ellos se compara el asentamiento de hormigones con AFRs respecto del obtenido en hormigones con agregados finos naturales silíceos. En tal caso, parte de las diferencias encontradas podrían atribuirse más a la forma y textura de las partículas de los AFRs que a la absorción que pudieran tener. En línea con ello, de los resultados obtenidos en el presente estudio se evidenció que cuando la forma de las partículas del agregado reciclado fueron más cúbicas que las del agregado natural de referencia, las consistencias de las mezclas recicladas fueron similares o menores que las del hormigón patrón. Debe tenerse presente que estudios específicos deben llevarse a cabo a fin de dar una solución tecnológica acorde a las diferencias planteadas. A modo de ejemplo, puede mencionarse que cuando un agregado anguloso pretende utilizarse en mezclas sin perjuicio de la trabajabilidad, la solución tecnológica implica un aumento del contenido de finos en la mezcla. Cuando un agregado con alta absorción va a utilizarse, una posible solución es emplearlo en condición

sss. La atribución errónea de la causa que genera el efecto nocivo sobre la consistencia difícilmente conduzca a soluciones viables para evitarla.

En adición a lo anteriormente tratado, debe tenerse presente que la igualdad de la relación a/c efectiva en los hormigones patrones y reciclados no implica necesariamente que ambos hormigones presenten la misma consistencia. Sumado a ello, las inconsistencias planteadas en párrafos anteriores respecto de la relación a/c efectiva y las consecuencias sobre el estado endurecido al incrementarla involuntariamente, parecieran ser suficientes para cuestionar la práctica de compensar la absorción de los AFRs. Emplear mayores dosis de aditivos reductores de agua resultaría entonces una práctica adecuada para evitar tales efectos perjudiciales.

Por otra parte, de forma análoga a lo discutido anteriormente, podría interpretarse que la mayor contracción por secado en morteros y hormigones reportada en la bibliografía al emplear AFRs es debida a una mayor relación a/c utilizada respecto del patrón, y no a una consecuencia directa de las propiedades del AFR empleado. Al respecto, de los resultados experimentales del presente trabajo de tesis surge que es posible obtener similares niveles de contracción en hormigones en los que se emplean AFRs, independientemente de sus características particulares. Más aún, de los resultados obtenidos al aplicar modelos predictivos de tal propiedad surge que no existen grandes diferencias en su aptitud para estimar la contracción última en hormigones en los que se emplea AFR. Consecuentemente es posible aseverar que la menor densidad, el mayor contenido de pasta, porosidad, absorción de agua y material menor a 75 μm que poseen los AFRs en comparación con los agregados naturales no modifican el comportamiento frente a la contracción de las mezclas. Incluso un efecto beneficioso de tales variables sobre la contracción por secado podría generarse en los mecanismos de difusión de la humedad interna.

Cabe mencionar que aún a pesar de las mencionadas consideraciones, en este y otros tantos estudios realizados sobre la temática surge que es posible elaborar hormigones empleando AFRs provenientes de la trituración de hormigones que culminaron su vida en servicio sin que el desempeño mecánico, durable, elástico y frente a la contracción por secado se vea nocivamente modificado. Tal hecho representa una ventaja medioambiental significativa por cuanto disminuye la utilización de materias primas no renovables, como son los AFN, a la vez que disminuye el volumen de vertido de este residuo, permitiendo un mejor aprovechamiento de los AR en general.

Finalmente, resulta evidente que aún se requiere de un nivel de conocimiento mayor respecto a la influencia real de los AFRs sobre las propiedades del estado fresco y endurecido de hormigones. Para ello las cuestiones planteadas precedentemente deben necesariamente ser tenidas en cuenta.

8.5 Estudios futuros

A partir del análisis de los resultados reportados en la bibliografía sobre la temática, conjuntamente con los obtenidos en este trabajo de tesis, surge la necesidad de realizar mayores estudios tendientes a esclarecer diferentes cuestiones relacionadas con la influencia de los AFRs sobre las propiedades de los hormigones. A continuación, se indican algunos estudios futuros que se consideran necesarios realizar:

- Estudiar la absorción de agua de los AFRs, tanto en lo referente a su determinación fehaciente como en lo relacionado a la tasa de absorción durante el mezclado. Ello permitiría el cálculo fidedigno de la relación a/c efectiva en hormigones al emplear AFRs, a fin de interpretar la influencia real que supone su empleo sobre el desempeño de las mezclas elaboradas.
- Se sugiere estudiar en profundidad los cambios que pudiera generar el empleo de AFRs en la distribución y contenido de poros y en la interfaz agregado-pasta. Tal característica podría vincularse con los procesos de secado y consecuentemente con el fenómeno de contracción asociado, como así también con las características durables.
- Otro ítem a considerar para su posible estudio sería el desarrollo de métodos de diseño de mezclas que tengan en cuenta las características propias de los AFRs. El método del Volumen de Mortero Equivalente contempla el empleo de AGR y ha permitido utilizar menores contenidos de cemento para obtener hormigones con similares niveles resistentes que aquellos elaborados con agregados naturales. Análogamente, los fundamentos del método podrían ser aplicados para la dosificación de hormigones con AFRs si se considera el contenido de pasta en lugar del contenido de mortero.
- Finalmente, se considera necesario realizar estudios tendientes a determinar datos cualitativos y cuantitativos respecto a los volúmenes generados y a la composición de los AFRs, así como también en lo referido a la metodología pertinente para su clasificación y gestión. En nuestro país existe una carencia significativa de estadísticas

respecto a la gestión y clasificación de los residuos. Tal información es necesaria para definir estrategias de vertido y reutilización.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO T 304. (2015). Uncompacted Void Content of Fine Aggregate. AASHTO International.
- Aboud-Zeid, et al (2001). Control of Cracking in Concrete Structure. Report ACI committee 224. 12-16.
- Acker.P. (1997). Creep and Shrinkage of Concrete: Physical Origins, Practical Measurements. Join Wano/OECD-NEA Workshop Prestress loss in NPP Cointainments.Poitiers Francia.
- Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M, Kahn, H, Cincotto, M.A. (2009). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*. 29. pp. 721-730.
- Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M, Kahn, H, Cincotto, M.A. (2009). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*. 29. 721-730.
- ACI 209 R (1992). Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures. ACI Report Technical Committee. USA.
- ACI 211, Committee 211 (2009). Standard practice for selecting proportions for normal, heavy weight and mass concrete. American Concrete Institute.
- ASTM C 128 (2001). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregates. ASTM international.
- ASTM C 642 (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM international.
- ASTM C 1084 (2010). Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete. ASTM international.
- ASTM C 1437 (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortars. ASTM international.
- Arm, M. (2001). Self-Cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: Results from triaxial and field test. *Waste Management*. 21, 235-239.
- Ayano, T., Wittmann, F.H. (2002). Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement-based materials. *Materials and Structures*. 35, 134-140.
- BA, M., Qian, C, Wang, H. (2013). Effects of Specimen Shape and Size on Water Loss and Drying Shrinkage of Cement-based Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials*. 733-740. doi:10.1007/s11595-013-0761-y
- Bascoy, D.A. (1992). Tecnología del Hormigón Fresco AATH Editorial Biblos. Buenos Aires Argentina.
- Bazant, Z.P., Wittmann, F.H. (1982). Creep and Shrinkage in Concrete Structures. A Wiley-Intercienze publications. Edited by John Wiley and Sons. Chichester. New York.
- Bazant, Z.P. (1972a). Thermodynamics of Hindered Adsorption and Its Implications for Hardener Cement Past and Concrete. *Cement and Concrete Research*. 2. 1-16.
- Bazant, Z., Najjar, L. (1972b). Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*. 5 (25), 3-20.

- Bazant, Z.P. (1972c). Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*. 20 (2), 477-505.
- Bazant, Z.P., Baweja, S. (2000). Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3, Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage - Structural Design Effects ACI SP-194.
- Beltzung, F., Witmman, F.H. (2005). The Role of Disjoining Pressure in Cement Based Materials. *Cement and Concrete Research*. 35, 2364-2370.
- Bissonnette, B., Pierre, P., Pigeon, M. (1999). Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research*. 29, 1655-1662.
- Brundtland, G.H. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. ONU.
- 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, 199p
- Cabrera Jara, R.D., Acosta Casal, A. y Medina Acosta, A. (2011). Diseño de Mezclas de Hormigón- Método del Factor Retenido y la Graduación Geométrica: Un Estudio Experimental. Primer Congreso de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Asunción. Paraguay. Disponible en <http://ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/>
- Cabrera, A.O., Zega, C.J., Di Maio, A.A, Sota, J.D. (2012). Ese Material Llamado Hormigón. Capítulo 5. AATH Editorial Biblos. Buenos Aires Argentina.
- Cabrera, O.A. (2013). Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina (2013), 265p. Disponible en <http://digital.cic.gba.gob.ar/>.
- Carrizo, L., Sosa, M.E., Zega, C.J., Villagrán Zaccardi, Y.A. (2016). Determinación efectiva del estado saturado a superficie seca en arenas de trituración. En 21º Reunión Técnica de la AATH. 415-422 Salta, Argentina.
- Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J.R., Ledesma, E. F. (2015) Rheological behaviour of concrete with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 89. 36-47.
- Castro M.J. (2011). Estudio de Morteros con Árido Reciclado de Hormigón. Tesis de Master. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politecnica de Madrid. España. 85p.
- Choi, H., Lim, M., Choi, H., Kitagaki, R., Noguchi, T. (2014). Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *Journal of Environmental Protection*. 5, 583-596.
- Corinaldesi, V. y Moriconi, G. (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 23, 289-294.
- Cortezzi, C.R., Traversa, L.P., Pavlicevic, R.E. (1988). Aspectos Geotécnicos de los Principales Agregados para Hormigones Empleados en la República Argentina. 3º Congreso Nacional de Geología Económica. Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
- Dapena Garcia, J.E., Alaejos, P., Lobet, A. Perez, D. (2009). Propiedades del árido fino procedente del reciclado de hormigón estructural. II Congreso nacional de Áridos, Valencia, España.
- De Brito, J. Saikia, N. (2013). Recycled Aggregate in Concrete. Use of Industrial Construction and Demolition Waste. Springer.

- De Larrard, F. y Sedran, T. (1994). Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a PakingModel. *Cement and Concrete Research*. 24 (6), 997-1009.
- De Larrard F. (2011). Concrete Mixture Proportioning. Modern Concrete Technology Series. Israel.
- Evangelista, L., de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 32, 9-14.
- Evangelista, L., de Brito, J. (2004). Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production. In: Vázquez, E., Hendriks, C.F., Jansen, G.M.T. (Eds.), Proc. Int. RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures, RILEM. 503-510. Barcelona, Spain.
- Evangelista, L., de Brito, J. (2014). Concrete with Fine Recycled Aggregates: a Review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 18, 129-172.
- Evangelista, L., Guedes, M., de Brito, j., Ferro, A.C., Pereira, M.F. (2015). Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Fine Recycled Aggregates Made from Concrete Waste. *Construction and Building Materials*. 86, 178-188.
- Fan, C-C., Huang, R., Hwang, H., Chao, S-J. (2015). The Effects of Different Fine Recycled Aggregates on the Properties of Mortars. *Materials*. 8, 2659-2672.
- Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqput, A.G., Isgor, O.B., Fournier, B., Foo, S. (2009) New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materilas in Civil Engineering*.
- Fava, A. (1968). Conocimientos y Medios Disponibles para Aumentar la Productividad en el Campo de la Tecnología del Hormigón.
- Florea, M.V.A., Brouwers, H.J.H. (2012). Recycled Concrete Fines and Aggregates-the Compositions of Various Size Fractions Related to Crushing History. In 18va Ibausil International Conference on Building Materials.pp.1034-1041.Weimar Alemania.
- Florea, M.V.A., Brouwers, H.J.H. (2014). Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. *Construction and Building Materials*. 50, 1-12.
- Gadner, N.L., Lockman, M.J. (2001). Design Provisión for Drying Shrinkage and Creepp of Normal-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*. pp. 159-167.
- Giaccio, G., Zerbino, R. (1997). Concrete as a composite material: effect of the coarse aggregate and matrix strength level. *L'industria italiana del cemento*.6 (22), 486-493.
- González Arias, E. (2012). Nueva Técnica de Dosificación de Hormigones Reciclados: Método del Volumen de Mortero Equivalente Tesis de Magister. Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. España. 124p.
- Hansen, T.C., Narud, H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregates. *Concrete International*.1 (5), 79-83.
- Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Second state-of-the-art. Report developments. *Materials and Structures*. 19 (3), 1845-1985.
- Hansen, W. (1987). Drying Shrinkage Mechanisms in Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*. 70 (5), 323-328.
- Hansen, T.C., Mattock, A.H. (1996). Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete. *ACI Journal Proceedings*. (63) 2, 267-290.

- Hendriks, C.F. (2000). Durable and Sustainable Construction Materials. AENEAS. NI 2000.
- Hincapié Henao, A.M., Aguja López, E.A. (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista Universidad Eafit*. 132 (39), 76-89.
- Hobbs, D.W. Mears, M.A. (1971). The influence of specimen geometry upon weight change and Shrinkage of air-dried mortars specimen. *Magazine of Concrete Research*. 23, (75-76), 89-98.
- Idiart, A. (2008). Análisis Numérico de la Contracción por Secado en muestras de hormigón Tesina Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. España.
- Imamoto, K., Arai, M. (2008). Simplified evaluation of shrinkage aggregate based on BET surface area using water vapor. *Journal of Advance Concrete Technology*. 6 (1), 69-75.
- IRAM 1871:2004. Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1504:2005. Cemento pórtland. Análisis químico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1505:2005. Agregados. Análisis granulométrico. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1525:1985. Agregados. Método de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1532:2009. Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método Los Angeles. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- 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 y Certificación, Argentina.
- IRAM 1536:1978. Hormigón fresco de cemento Pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1540:2004. Agregados. Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm , por lavado. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1546:1992. Hormigón de cemento Pórtland. Método de ensayo de compresión. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1562:1978. Hormigón fresco de cemento Pórtland. Método de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de aire. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1602-1:1988. Hormigón de cemento Pórtland. 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 y Certificación, Argentina.
- IRAM 1604:2004. Hormigón. Método de ensayo para determinar la exudación. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1621:2006. Cemento pórtland. Método de ensayo de finura por tamizado humedo. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.

- IRAM 1622:2006. Cemento pórtland. Determinación de resistencias mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1623:2004. Cemento pórtland. Método de ensayo de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método Blaine). Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1687-1:1996. Agregados. Método de determinación del índice de lajosidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 1687-2:1997. Agregados. Determinación del índice de elongación. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- IRAM 50000:2014. Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina.
- Jiménez, C., Aponte, D., Vázquez, E., Barra, M., Valls, S (2013). Diseño de mezclas de Hormigón mediante el Método de Mortero Equivalente (EMV): Validación bajo el contexto Español y su Adaptación al Método de Diseño Bolomey. *Materiales de Construcción*. 63, (311), 341-360.
- Leff, E. (1998). Saber Ambiental - Sustentabilidad, Racionalidad, Complejidad, Poder. Siglo XXI Editores. Mexico.
- Leite, M.B. (2001). Avalia o de propriedades mec nicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de constru o e demoli o. Tesis doctoral Escola de Engenharia. Universidad Federal Rio Grande Do Sul. Brazil. 290p.
- Leite, M.B., Figueire do Filho, J.G.L., Lima, P.R.L. (2013) Workability studies of concretes made with recycled mortar aggregates. *Materials and structures*. 46, 1765-1778.
- Leite, M.B., Figueiredo Filho, J.G.L., Lima, P.R.L (2013). Workability Study of Concretes with Recycled Mortar Aggregates. *Materials and Structures*. 46, 1765-1778.
- Lima, P.R.L, Leite, M.B. (2012). Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. *Open Journal of Civil Engineering*. 2. 53-57.
- Limbachiya, M.C., Leelawat, Dhir, R.K. (2000). Use of Recycled concrete Aggregate in High-Strength Concrete. *Materials and Structures*. 33 (9), 574-580. DOI:10.1007/BF02480538.
- Katz A. (2003). Properties of concretes made with recycled aggregates from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*. 33, 703-711
- Khatib, J.M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*. 35, 763–769.
- Khoshkenari, A.G., Shafigh, P., Moghimi, M, Mahmud, H.B. (2014). The Role of 0-2 mm Fine Recycled Concrete Aggregate on the Compressive and Splitting Tensile Strengths of Recycled Concrete Aggregate Concrete.
- Kim, S-W., Yun, H-D. (2014). Evaluation of the Bond Behavior of Steel Bars in Recycled Fine Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 46. 8-18.
- Kim, J., Zi, M., Lange, D.A. (2017). Measurement of Water Absorption on Very Fine Particles Using Electrical Conductivity. *ACI Materials Journal*. 114 (6), 957-965.
- Kostmaka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. (2008). Designing and Proportioning Normal Concrete Mixtures. 14th End. Portland Cement Association. Chicago, USA.

- Kou, S.C, Poon, C.S. (2009). Properties of self-Compacting Concretes prepared with coarse and Fine Aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 31 (9), 622-627.
- Li, X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China: Parte I. Material Behaviour of recycled aggregates concretes. *Resources, Conservation and Recycling*. 53, 36-44.
- Ma, B-g., Wen, X-d., Wang, M-y., Yan, J-j., Gao, X-j. (2007). Drying Shrinkage of Cement-Based Materials Under Conditions of Constant Temperature and Varying Humidity. *Journal of China University of Mining and Technology*.17 (3), 428-431.
- Mardani, A., Tuyan, M, Ramyar, K. (2014). Mechanical and Durability Performance of Concrete Incorporating Fine Recycled Concrete and Glass Aggregates. *Materials and Structures*. 48, 2629-2640.
- Martinez, I., Etxeberria, M., Pavon, E., Díaz, N. (2013).A Comparative Analysis of the Properties of Recycled and Natural Aggregate in Masonry Mortars. *Constructions and Building Materials*.49, 384-392.
- Martins, I., Müller, A., Di Maio, A, Forth, J., Kropp, J., Angulo, S., Vanderley, J. (2013) Use of Fine Fraction. Progress of Recycling in the Built Environment. Springer.
- Maruyama, I. (2010). Origin of Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hidration pressure. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2 (8), 187-200.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. (1972). The Limits of the Growth. Potomac Associate Books. MIT. Washington D.C. USA.
- Mehta, K.P., Monteiro, P.J.M. (1998). Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Mexico.
- Mindess, S. Young, J.F. (1981). Concrete.Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs.New Jersey.
- Moro, J.M., Meneses, R.S., Señas, L., Priano, C., Ortega, N.F. (2012). Agregados Reciclados de Canto Rodado Sometidos a Tratamientos Previos. 19º Reunión Técnica AATH. 391-398. Bahía Blanca, Argentina.
- NCH 2257-3 (1996). Determinación de la Consistencia. Parte 3: Método del Asentamiento del Cono. Instituto de Normalización Chile.
- Neville, A. M. (1975). Tecnología del Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México.
- Newman, K. (1969). The effect of water absorption by aggregates on the water/cement ratio of concrete. *Magazine of Concrete Research*. 11 (33), (1969) 135-142. DOI:10.1680/mac.1959.11.33.135
- Noguchi. T. (2008). Optimum Concrete Recycling in Construction Industries – Japanese Experience. International Expert Workshop on Cement and Concrete Technology for Sustainable Development. Beijin China.
- Pereira, P., Evangelista, L. y de Brito, J. (2012). The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 28, 722-729.
- Poon, C., Qiao, X.C., Chan, D. (2006). Cause and Influence of self-Cementing Properties of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Unbound sub-base. *Waste Management*. 26. 1166-1172.

Powers, T.C. (1949), The non-evaporable water content of hardened portland - cement paste. Its significance for concrete research and its method of determination, *ASTM Bulletin*. 68-75.

Ravindrarajah, S.R., Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*.130 (37), 29-38.

Ravindrarajah, S.R., Tam, T.C. (1987). Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 4 (9), 235-241.

Reixach, F.M., Cuscó, A.S., Barroso, J.M.G. (1998). Situación Actual y Perspectivas de Futuro de los Residuos de la Construcción. Proyecto LIFE. Institut Tecnològia de la Construcció de Catalunya.

RILEM (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*. 27 (9), 557-559.

Rodriguez, F., Carvalho, M.T., Evangelista, L., de Brito, J. (2013a). Physical-Chemical and Mineralogical Characterization of Fine Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants. *Journal of Cleaner Production*. 52, 438-445.

Rodriguez, F., Evangelista, L., de Brito, J. (2013b). A New Method to Determine the Density and Water Absorption of Fine Recycled Aggregates. *Materials Research*. 16 (5), 1045-1051.

Roper, H. (1966). Dimensional Change and Water Sorption Studies of Cement Paste. Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete. *Highway Research Board*. 74-83.

Sánchez, A.B. (2016). Hoja de ruta hacia un modelo sustentable. Informe Técnico sobre la Sustentabilidad en España. Fundación Alternativas. 161p.

Sánchez de Juan, M. (2005). Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis doctoral Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. España. 514p.

Serrano-Guzman, M.F., Perez-Ruiz, D. D. (2010). Análisis de la Sensibilidad para Estimar el Módulo de Elasticidad Estático del Concreto. *Concreto y Cemento*. 2 (1), 17-30.

Setzer, M.J. (1980). A Model of Hardened Cement Paste for Linkin Shrinkage and Creep phenomena. Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete. Edited by F.H. Witmann.

Seisui, K., Imamoto, K., Arai, M. (2010). Relation between concrete shrinkage strain and specific surface area measured by BET single point. In Annual meeting JCA. 5, 44, 5.

Şener, S., Şener, H.D., Koç, V. (2009). Drying Effect of Normal and High Strength Concrete Cylinders with Different Sizes. *Journal of Science*. 22 (4), 333-340.

Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K. (2014). Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production. *Construction and Building Materials*. 64, 201-217.

Solyman, M. (2005). Clasificación de Recycled Sand and their applications as Fine Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures. Tesis doctoral. Universidad de Kassel. Alemania. 194p.

Sosa, M.E., Villagrán Zaccardi, Y.A. Zega, C.J., Peralta, J.P. (2012a) Fresh Properties of Mortars made with Pozzolanic Cement and Water reducers. *MRS Proceedings*. Imrc12-1488-7b-004. doi:10.1557/opl.2012.1545.

- Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A., Peralta, J.P. (2012b). Evaluación de morteros con agregado fino reciclado en reemplazo de arena natural de trituración. 19° Reunión Técnica de la AATH. 415-422.
- Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A., Peralta, J.P. (2014). Evaluación de morteros con agregado fino reciclado en reemplazo de arena natural de trituración. 20° Reunión Técnica de la AATH. 415-422.
- Sosa, M.E., Zega, C.J., Cohelo Dos Santos, G.B., Di Maio, A.A. (2015a). Use of Fine Recycled Aggregate as supplementary Cementitious Material. Proceedings of III Progress of Recycling in the Build Environment. August. Sao Paulo, Brazil
- Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2015b) Influence of Fine Recycled Aggregates on Compressive Strength, Static Modulus of Elasticity and Drying Shrinkage of Concretes
- Sosa, M.E., Villagrán Zaccardi, Y.A., Peralta, J.P., Zega, C.J. (2018) Efficiency of cement-admixture systems in mortars with binary and ternary Portland cements. *Revista Dyna*. 204 (85). doi:dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.66468.
- Sui, Y., Muller, A. (2012). Development of a Thermo-Mechanical Treatment for Recycling of Used Concrete. *Materials and Structures*. 45, 1487-1495. DOI:10.1617/s11527-012-9852-z
- Tam, V.W.Y, Gao, X.F., Tam, C.M., Chan, C.H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 22 (3), 364-369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009.
- Tam, V.W. (2009). Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Journal of Cleaner Production*. 17, 688-702. DOI:10.1016/j.jclepro.S.11.015.
- Tovar Rodriguez, G. (2011). Estudio de morteros de agregado fino reciclado en matrices con cemento Portland y en matrices de escoria de horno alto activada alcalinamente. Tesis de magister, ETSECCPB, UPC, España. 75 p. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12119>.
- Troxel, G.E., Raphael, J.M., Davis, R.E. (1958). Long Time Creep and Shrinkage Test of Plain and Reinforced Concrete. *ASTM Proceedings*. 58, 1101-1120.
- Ulsen, C, Kahn, H., Hawlitschek, G. Masini, E.A., Angulo, S.C. (2012). Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. *Waste Management*. 33 (3), 656-662.
- Ulsen, C, Kahn, H., Hawlitschek, G. Masini, E.A., Angulo, S.C. (2013). Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*. 40, 1168-1173.
- Valencia, G.A., Santos, W.F., Angulo, S.C., Pileggi, R.G. Effect of Superplastizicer on Mortars with Recycled Fine Aggregates. Proceedings of III Progress of Recycling in the Build Environment. Sao Paulo, Brazil.
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., Frías, M. (2009). Diseño y Prestaciones de Morteros de Albañilería Elaborados con Áridos Reciclados Provenientes de Escombros de Hormigón. *Materiales de Construcción*. 59 (295), 5-18.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Zkoczylas, F., Wirquin, E. (2003). Assessment of the Surface Permeation Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Composites*. 25, 223-232.
- Zega, C.J, Taus, V., Di Maio, A.A. (2006). Effect of Entrained Air on Recycled Concrete Properties. *Journal of ASTM International*. 3 (10), 1-17. DOI: doi.org/10.1520/JAI100289.

- Zega, C.J., Di Maio (2006). Comportamiento de Hormigones Elaborados con Agregado Fino Reciclado. 16° Reunión Técnica de la AATH. 415-422. Mendoza, Argentina.
- Zega, C.J. (2010). Propiedades Físico-Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 166p.
- Zega, C.J., Sosa, M.E., Di Maio, A.A. (2010). Propiedades de los Agregados Finos Reciclados Procedentes de Hormigones Elaborados con Diferentes Tipos de Agregados Gruesos Naturales. 16° Reunión técnica de la AATH. 33-38. Mar del Plata, Argentina.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*. 31, 2336-2340. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.06.011.
- Zega, C.J., Sosa, M.E., Di Maio, A.A. (2015). Recycled Fine Aggregate Concretes Exposed to High Temperature.
- Zhang, W., Zakaria, M., Hama, Y. (2013). Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 49, 500-510. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.069.
- Zhao, Z., Remond, R., Daminot, D., Xu, W. (2013). Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Journal on Sustainable Cement-Based Materials*. 2 (3), 186-203. DOI:10.1080/21650373.2013.812942

Anexo I

I.1 Introducción

Powers (1949) desarrolló un modelo a partir del cual es posible estimar las cantidades de los productos de hidratación y calcular consecuentemente la porosidad capilar de la pasta de cemento hidratada o bien el grado de hidratación alcanzado.

En este modelo se considera al C-S-H como un gel con poros de tamaños entre 0,15 y 0,20 nm de diámetro y una porosidad característica del 28%. Dicha porosidad resulta independiente de la relación a/c y del grado de hidratación de la pasta. Debido a la estructura particular de este gel, la cual se presenta en la Figura I.1 el agua presente en el cemento hidratado queda retenida con distintos grados de firmeza, distinguiéndose el agua libre, la cual se encuentra en los grandes capilares y puede removerse con facilidad; Agua absorbida la cual se encuentra retenida mediante fuerzas superficiales de las partículas de gel; Agua zeolítica o entre capas la cual se encuentra retenida por la adhesión del hidrógeno y Agua químicamente combinada que es aquella que forma parte de la estructura de los productos de hidratación y representa un 23% del peso del cemento anhidro. Sin embargo y con el fin de poder realizar el cálculo antes mencionado el modelo distingue entre agua evaporable y no evaporable. En tal sentido el agua evaporable es aquella que puede removerse con el secado a temperatura de 105°C, por congelamiento o bien por remoción con solventes. Mientras que el agua no evaporable es aquella que no puede ser removida mediante el secado y en ella se encuentra contenida parte de la que no se encuentra ligada por enlaces químicos y representa el 25.4% del volumen de cemento anhidro.

Bajo estos preceptos el volumen de los productos sólidos de hidratación viene dado por el volumen del cemento anhidro más el volumen de agua combinada menos el volumen del agua no evaporable de acuerdo a la Ec I.1. La suma de este último y el agua de gel (Ec I.2) representan el volumen del cemento hidratado.

$$V_{ph} = W_c / \text{densidad} + W_{ac} - (0.254 \cdot W_c / \text{densidad}) \quad (\text{Ec I.1})$$

Donde:

V_{ph}: Volumen de los productos sólidos de hidratación

Wc= Peso del cemento anhidro

Wac= Volumen de agua combinada

$$Wg = \frac{Wg}{V_{ph+Wg}} = 0.28 \quad (\text{Ec I.2})$$

Donde:

Wg= volumen de agua de gel

Con ambas ecuaciones considerando un grado de hidratación del 100% es posible calcular el volumen de la porosidad capilar mediante la Ec I.3.

$$V_{pc} = W_a + W_c/\text{densidad} - W_c/\text{densidad} - V_{ph} - W_g \quad (\text{Ec I.23})$$

Donde:

V_{pc}: Volumen de la porosidad capilar

W_a= volumen de agua de mezclado

V_{pc}= Volumen de los poros capilares

Cabe mencionar que en términos prácticos es imposible obtener un grado de hidratación del 100%. Sin embargo, dicha hipótesis resulta conveniente puesto que el modelo se presenta con el fin de una estimación de comparativa de los productos de hidratación de hormigones curados bajo las mismas condiciones.

I.2 Calculo de los volúmenes de hidratación en los hormigones patrones

Puesto que el contenido de los productos de hidratación en los AFRs dependerá de las dosificaciones de los hormigones patrones de los cuales provienen, se presentan en la Tabla I.1 dosificaciones de los mismos y los cálculos realizados conforme las ecuaciones presentadas en función del modelo de Powers (1949). Debe tenerse en cuenta que en el caso de los hormigones cuarcíticos parte del agua utilizada para su elaboración corresponde a la absorción del agregado cuarcítico y por lo tanto bastaría con presentar los valores calculados para las relaciones a/c 0,40 y 0,55 sin distinguir el agregado utilizado. Sin embargo, en los distintos capítulos de la tesis se demostró de manera experimental y mediante la relación entre distintas variables y el agua total de mezclado, que el agua adicionada no es absorbida en su totalidad por el agregado. En consecuencia y como no es

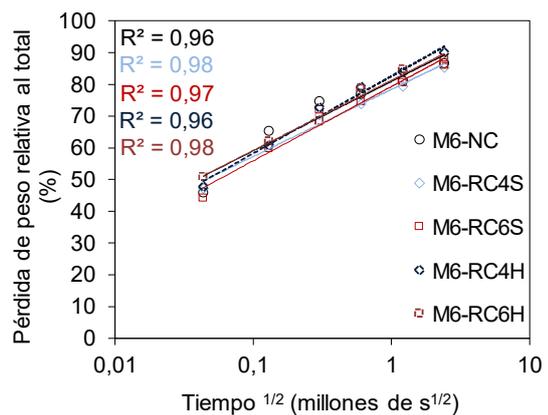
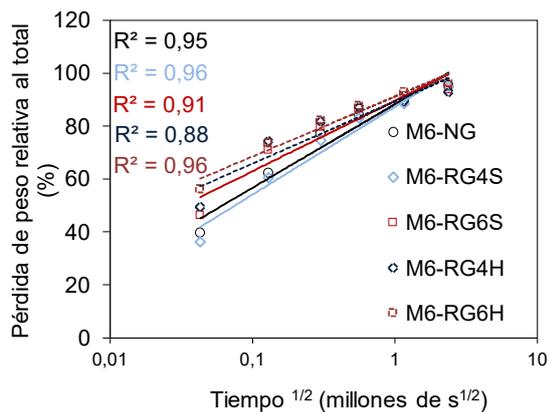
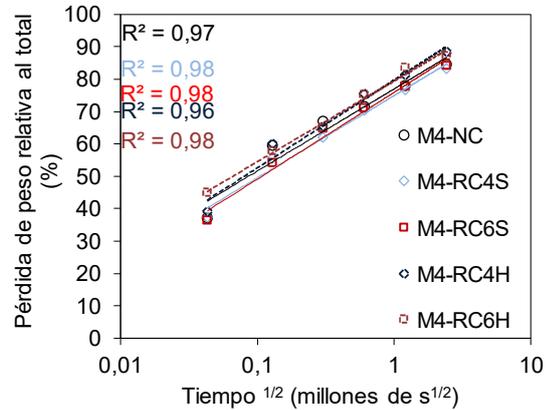
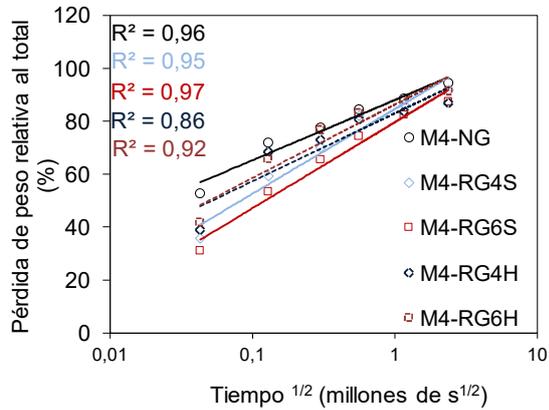
posible determinar con certeza que parte del agua adicionada fue absorbida por el agregado y cual permaneció como agua de mezclado, se presentan en el caso de los hormigones con agregados cuarcíticos las dosificaciones considerando que toda el agua utilizada constituye el agua de mezclado. Tal afirmación aún si no resultara cierta pretende cubrir los valores extremos, puesto que necesariamente si parte del agua adicionada es absorbida por el agregado, el valor real se encuentra dentro del rango de los valores obtenidos de considerar a tales hormigones con su relación a/c potencial, es decir los productos de hidratación coincidirán con los de los hormigones con agregados graníticos o los presentados para los cuarcíticos con las consideraciones mencionadas respecto al agua de mezclado.

Tabla I.1. Dosificación y cálculo de los productos de hidratación para los hormigones patrones conforme el modelo de Powers (1949).

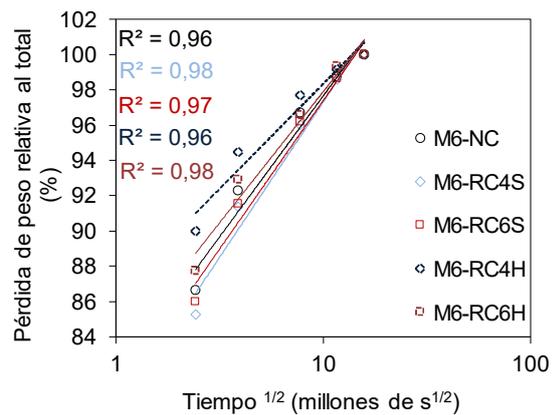
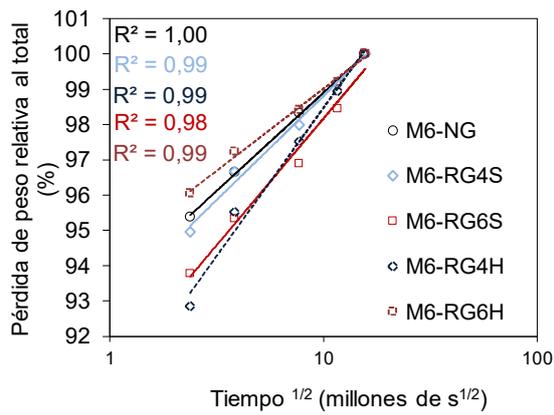
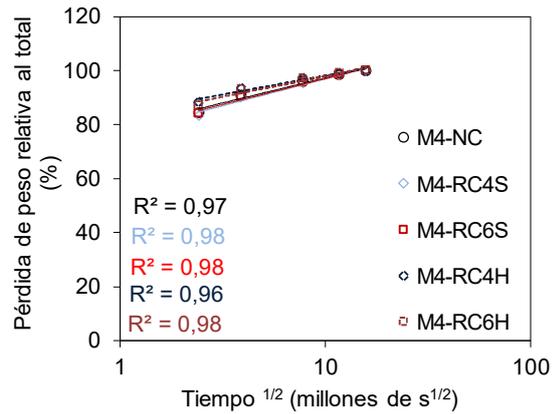
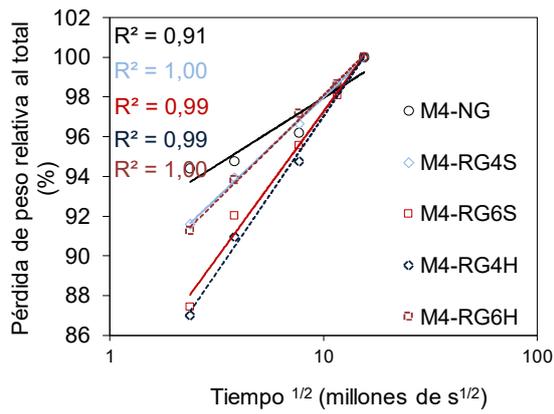
Composición	Hormigón de origen del (AFR)			
	H4-NG (RG4)	H6-NG (RG6)	H4-NC (RC4)	H6-NC (RC6)
Agua (lts)	152	174	174	196
Cemento (kg/m ³)	381	315	381	315
Vph (lts/m ³)	192	159	192	159
Wac (lts/m ³)	88	72	88	72
Wg (lts/m ³)	74	62	74	62
Porosidad (lts/m ³)	12	58	34	80
Porosidad (%)	4,23	21	11	27
Peso de los productos de hidratación (Kg/m ³)	469	387	469	387

Anexo II

Conforme a lo discutido en la sección 7.2.3 se presentan a continuación las curvas Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo de los intervalos 1-56 días y 56-365 días para los morteros bajo estudio.

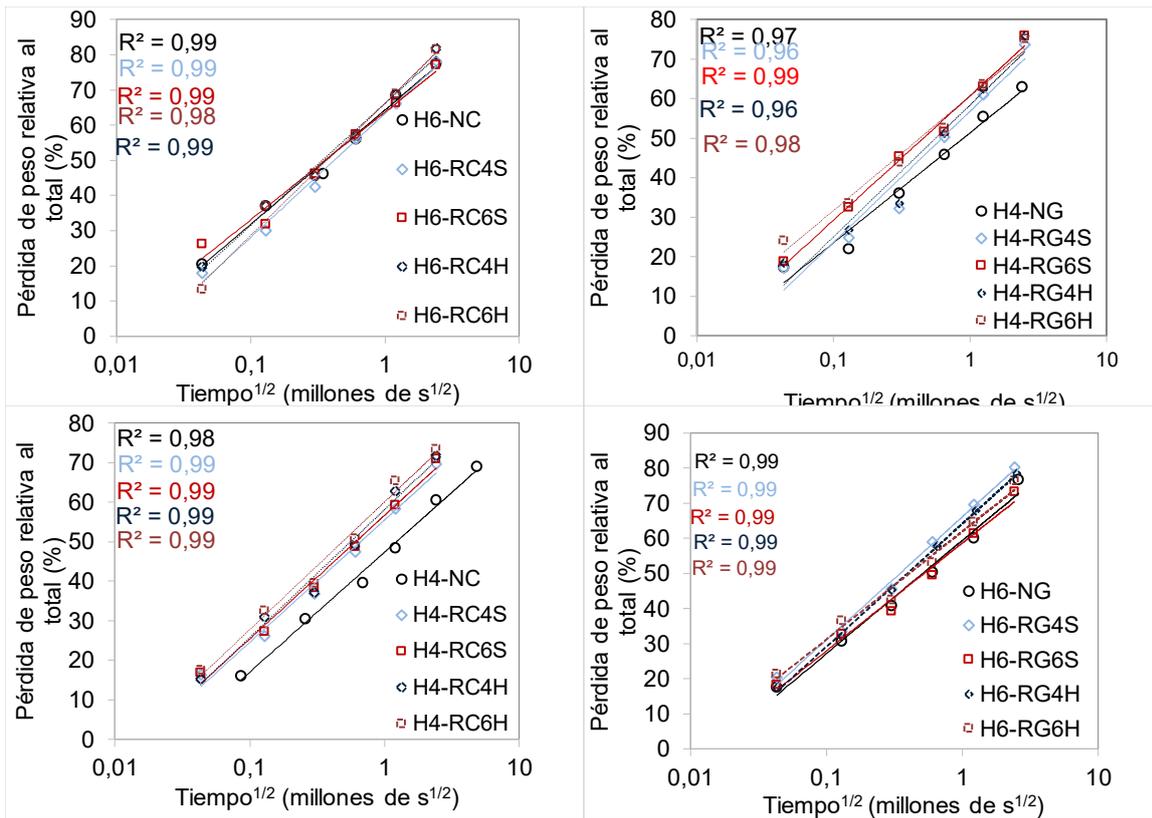


Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo días en morteros para el intervalo 1-56

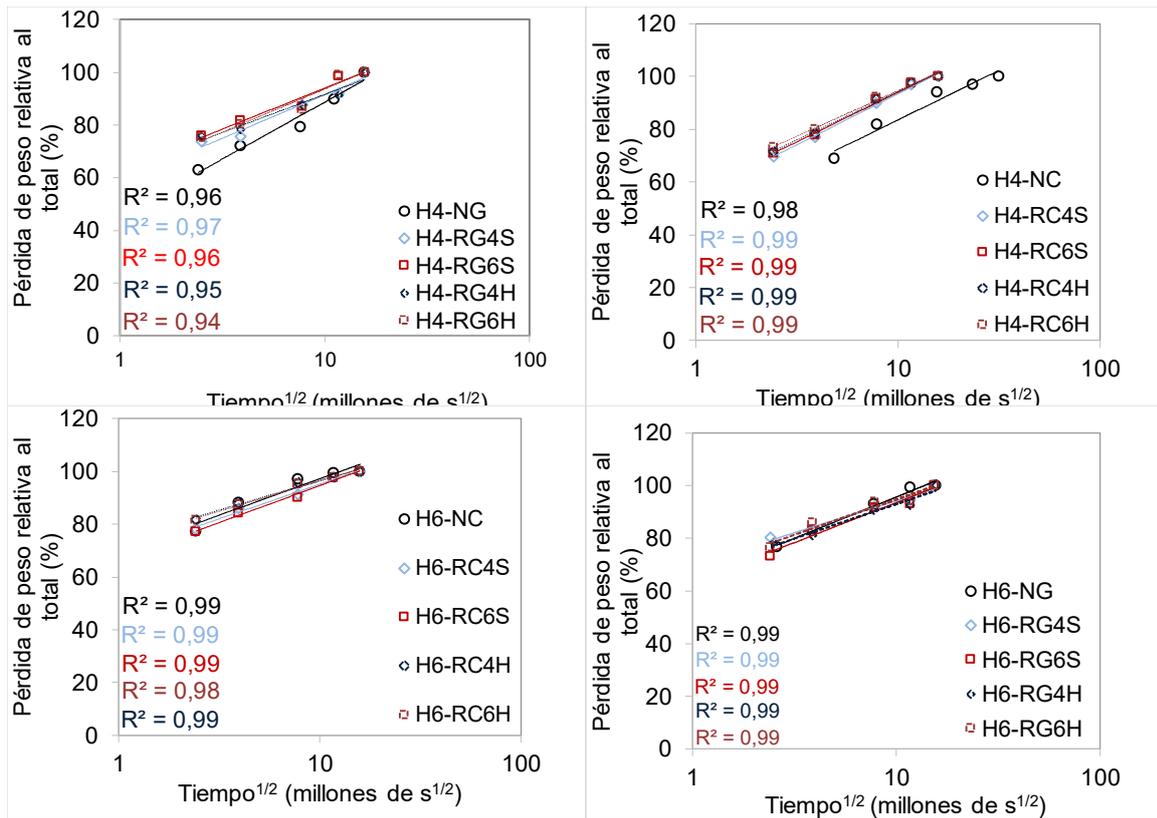


Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo días en morteros para el intervalo 56-365

De acuerdo a lo discutido en la sección 7.3.4 se presentan a continuación las curvas Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo de los intervalos 1-56 días y 56-365 días para los hormigones bajo estudio.



Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo días en morteros para el intervalo 1-56



Pérdida de peso en función de la raíz cuadrada del tiempo días en morteros para el intervalo 56-365

En conformidad con lo enunciado en la sección 7.4.2. se presentan a continuación los coeficientes que surgen de aplicar el método ACI R 209 para la estimación de la resistencia en los hormigones bajo estudio.

Coeficientes para la estimación de la contracción por secado

Hormigones	Y_{sh}	Y_{TC}	Y_{HR}	Y_{vs}	Y_s	Y_{ψ}	Y_c	Y_{α}
H4-NC	0,730	0,860	0,890	1,000	0,987	0,985	0,982	0,953
H4-RC4S	0,727	0,860	0,890	1,000	0,987	0,980	0,982	0,953
H4-RC6S	0,738	0,860	0,890	1,000	1,003	0,979	0,982	0,953
H4-RC4H	0,763	0,860	0,890	1,000	1,035	0,980	0,982	0,953
H4-RC6H	0,749	0,860	0,890	1,000	1,019	0,978	0,982	0,953
H4-NG	0,707	0,860	0,890	1,000	0,979	0,961	0,982	0,952
H4-RG4S	0,707	0,860	0,890	1,000	0,707	0,952	0,982	0,953
H4-RG6S	0,772	0,860	0,890	1,000	1,083	0,948	0,982	0,952
H4-RG4H	0,686	0,860	0,890	1,000	0,962	0,948	0,982	0,952
H4-RG6H	0,715	0,860	0,890	1,000	1,003	0,948	0,982	0,953
H6-NC	0,701	0,860	0,890	1,000	0,987	0,985	0,942	0,953
H6-RC4S	0,698	0,860	0,890	1,000	0,987	0,980	0,942	0,953
H6-RC6S	0,676	0,860	0,890	1,000	0,954	0,982	0,942	0,953
H6-RC4H	0,703	0,860	0,890	1,000	0,995	0,980	0,942	0,953
H6-RC6H	0,684	0,860	0,890	1,000	0,971	0,978	0,942	0,953
H6-NG	0,685	0,860	0,890	1,000	0,987	0,962	0,962	0,953
H6-RG4S	0,672	0,860	0,890	1,000	0,979	0,952	0,942	0,952
H6-RG6S	0,642	0,860	0,890	1,000	0,938	0,948	0,942	0,953
H6-RG4H	0,716	0,860	0,890	1,000	1,043	0,952	0,942	0,952
H6-RG6H	0,686	0,860	0,890	1,000	1,003	0,948	0,942	0,953