



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Doctor en Ingeniería

**“Caracterización y durabilidad de hormigones reciclados.
Corrosión de armaduras”**

Juan Manuel Moro

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2016

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, durante el período comprendido entre agosto de 2009 hasta diciembre de 2015, bajo la dirección del Dr. Ing. Néstor F. Ortega, y la co-dirección de la Dr. Ing. Raquel R. Aveldaño.

Ing. Juan Manuel Moro



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente Tesis ha sido aprobada el / / mercedo
la calificación de (.....)

A mis abuelos, por haber sido una fuente de inspiración al esfuerzo y superación permanente

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Departamento de Ingeniería, a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por brindarme las condiciones necesarias en instalaciones, laboratorios, instrumental y apoyo económico para llevar a cabo las investigaciones que aquí se presentan.

Asimismo, agradezco a mi director de tesis, Dr. Ing. Néstor F. Ortega, y a mi co-directora, Dra. Ing. Raquel R. Aveldaño, por su gran apoyo y asesoramiento durante el desarrollo de esta Tesis, aportando sus experiencias y conocimientos en las distintas etapas, guiando y mejorando la investigación y brindando contención en todo momento, con comprensión y entusiasmo.

Por otra parte, quiero reconocer a la Ingeniera Lilia N. Señas y la Dra. Ing. Carla Priano, del Laboratorio de Estudio y Ensayo de Materiales del Departamento de Ingeniería de la U.N.S., quienes realizaron los ensayos de caracterización de materiales y generaron un importante aporte en esta investigación, en base a su gran experiencia y conocimiento sobre materiales, elaboración y dosificación de hormigones.

También quiero expresar mi agradecimiento a los laboratoristas Juan P. Gorordo y Diego Smith, del Laboratorio de Modelos Estructurales y del Laboratorio de Estudio y Ensayo de Materiales respectivamente, quienes colaboraron en el armado de los elementos de ensayo, y en la logística y elaboración de los hormigones.

Estoy muy agradecido a la Empresa Fernández y Fernández, que aporta toda la arena, canto rodado y el cemento utilizados en la elaboración del hormigón, empleado en las investigaciones de esta Tesis.

Mi reconocimiento a todos los colegas docentes e investigadores de las Áreas de Hormigón y Estabilidad, quienes además de hacer un excelente trabajo en sus tareas pertinentes, generan un clima de trabajo agradable y cordial.

Quisiera dejar constancia de mi agradecimiento a mis padres Perla y Jesús y hermanos Rodrigo y Fernando quienes, desde el ejemplo, siempre inculcaron excelentes valores de esfuerzo y dedicación, como así también de compañerismo y respeto.

No puedo dejar de mencionar y agradecer a la familia Meneses, quienes fueron un soporte muy importante para concretar este objetivo, por su gran ayuda en la organización de la vida cotidiana y por la contención y el cariño brindado en todo momento.

Finalmente, quiero expresar un agradecimiento especial a mi compañera de vida y trabajo, mi esposa e Ingeniera Romina Meneses, por estar presente siempre y brindarme todo su apoyo, contención y colaboración en esta investigación y en la crianza de nuestros hermosos hijos Tomás y Sofía, quienes son el motor de nuestras vidas.

Caracterización y durabilidad de hormigones reciclados.

Corrosión de armaduras

Juan Manuel Moro

RESUMEN

El uso masivo del hormigón en el mundo y la necesidad de promover la sustentabilidad de las construcciones aumenta la importancia del reciclado de este material, y una alternativa es utilizarlo como agregado de un nuevo hormigón, obteniendo lo que se conoce como “hormigón reciclado”.

En la presente Tesis se realizó un estudio para determinar las cantidades de residuos de construcción y demolición generados en la ciudad de Bahía Blanca, y en particular, de los desechos de hormigón, lo que permite situar y comparar los valores obtenidos con los de otros lugares del mundo. Los resultados permitieron desarrollar un análisis sobre las cantidades, proporciones, gestión y posibilidades de reciclado del mismo, en el contexto de nuestro país.

Por otro lado, se plantearon diferentes variantes para la elaboración del hormigón reciclado, en busca de mejorar las características durables de este tipo de hormigones:

- Se moldearon probetas de hormigón reciclado, con distinta relación agua / cemento, incorporándole diferentes aditivos.
- Se moldearon probetas de hormigón con un reemplazo del 50% del agregado grueso natural por hormigón triturado y sometido a distintos tratamientos previos a su utilización como agregados. Se empleó para ello, lechada de cemento y dos productos impermeabilizantes de distinta procedencia.
- Se fabricaron hormigones con un reemplazo del 50% del agregado grueso natural por hormigón triturado, el cual, previo al hormigonado fue sometido a un tratamiento de lechada de cemento. En dicho tratamiento se estudiaron dos variables: La relación agua / cemento de la lechada y la cantidad de días transcurridos entre la fecha de realización del tratamiento y la de hormigonado de las probetas.

- En base a los resultados obtenidos previamente, se estudiaron diferentes alternativas para realizar el tratamiento previo de lechada de cemento y la mezcla de los componentes del hormigón en forma simultánea, a partir de variaciones en el orden de ingreso de los materiales a la hormigonera. En este objetivo, se efectuaron cuatro formas diferentes de mezclado, variando el porcentaje de cemento de la primera etapa y la relación agua / cemento de la misma.

En todos los casos, se analizaron los efectos sobre las propiedades del hormigón obtenido, y se comparó su comportamiento con el de hormigones elaborados sin agregados reciclados y con agregados grueso reciclado sin tratamiento previo.

Por otro lado, se buscó establecer la influencia de algunos factores sobre el proceso de corrosión de las armaduras, ubicadas dentro de la masa de hormigones elaborados con agregado reciclado; para ello, se efectuaron diversos estudios de corrosión acelerada, sobre vigas construidas con agregados gruesos reciclados de hormigón, en las que se analizaron diferentes factores: i) la relación recubrimiento / diámetro de las barras; ii) la utilización de tratamientos sobre el agregado reciclado (previos o simultáneos al mezclado); y iii) la variación del porcentaje de reemplazo de agregado grueso natural, por agregado grueso de hormigón. Se realizó el seguimiento de la fisuración del recubrimiento de hormigón, de los Potenciales de Corrosión y del deterioro de las armaduras. Se determinó la influencia de los factores mencionados, en los resultados del proceso de corrosión.

Characterization and durability of recycled concrete. Reinforcement corrosion

Juan Manuel Moro

ABSTRACT

The widespread use of concrete in the world and the need to promote sustainability of constructions bring up the issue of recycling of this material, and one possibility is to use it as aggregate of new concrete, obtaining what is known as "recycled concrete".

In this thesis, a study was made to determine the quantities of construction and demolition waste generated in Bahía Blanca city, and in particular, concrete waste, allowing comparing the values obtained with those of other places in the world. The results allowed developing an analysis of the amounts, proportions, management and recycling possibilities of concrete waste in the context of our country.

Moreover, different possibilities were proposed for the production of recycled concrete, seeking to improve features related to durability of this type of concrete:

- Recycled concrete specimens were molded, with different water / cement ratio, incorporating different additives.
- Concrete specimens were molded with a replacement of 50% of natural aggregate by coarse crushed concrete and put through various pre-treatments before they were used as aggregates. In order to do so, a water / cement solution and two waterproofing products solutions from different sources were used.
- Concrete specimens were molded with a replacement of 50% of natural aggregate by coarse crushed concrete, which was put through a pre-treatment of water / cement solution before concrete elaboration. This study focused on two variables: The water / cement ratio of the solution and the number of days between date of the treatment and the elaboration of the specimens.
- Based on the results obtained previously, different alternatives were studied with regard to the pretreatment of water / cement solution and the mix of concrete ingredients. The two

factors were studied simultaneously through variations in the order of entry of the material into the mixer. For this purpose, four different ways of mixing were used, varying the percentage of cement of the first stage and water / cement ratio of the mix.

In all cases, the effects of treatments on concrete properties were analyzed, and the behavior of our recycled concrete was compared with that of concrete made without recycled aggregates and with that of recycled concrete with coarse aggregates without treatment.

In addition, we sought to establish the influence of several factors on the process of corrosion of reinforcement, located within the mass of concrete made with recycled aggregate. For that, various studies of accelerated corrosion on beams built with recycled coarse aggregate concrete were made, in which different factors were analyzed: i) the cover / bar diameter ratio; ii) the use of treatments of recycled aggregate (before or simultaneously with mixing); and iii) the percentage of replacement of natural coarse aggregate by recycled coarse aggregate. Cracking of concrete cover, corrosion potentials and reinforcing bars deterioration were monitored. The influence of these factors on the results of the corrosion process was determined.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Abstract	vi
Índice general	viii
Índice de figuras	xiv

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	Objetivos	1
1.2	Definición del problema	1
1.3	Líneas investigativas desarrolladas en la tesis	2
1.3.1	Gestión y producción de hormigón reciclado	2
1.3.2	Mejoras sobre el hormigón reciclado	3
1.3.3	Corrosión de armaduras en elementos de hormigón reciclado	4
1.4	Referencias	6

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

2.1	Consideraciones generales	10
2.2	Características del agregado reciclado de hormigón	11
2.2.1	Mortero adherido	11
2.2.2	Aspecto y composición	12
2.2.3	Forma y textura superficial	13
2.2.4	Granulometría	14
2.2.5	Densidad	15
2.2.6	Absorción de agua	16
2.2.7	Resistencia a la fragmentación	18
2.2.8	Durabilidad por ataque con sulfato de sodio	18
2.2.9	Contenido de polvo	19
2.2.10	Contenido de cloruros	19
2.2.11	Contenido de sulfatos	19
2.2.12	Reacción álcali – agregado	20

2.3	Hormigones reciclados	20
2.3.1	Estado Fresco	22
2.3.1.1	Consistencia	22
2.3.1.2	Densidad	24
2.3.1.3	Aire naturalmente incorporado	24
2.3.1.4	Exudación	24
2.3.2	Estado Endurecido	25
2.3.2.1	Densidad	25
2.3.2.2	Resistencia a compresión	25
2.3.2.3	Resistencia a tracción	27
2.3.2.4	Resistencia a flexión	28
2.3.2.5	Módulo de elasticidad estático	28
2.3.2.6	Densidad	30
2.3.2.7	Retracción y fluencia	30
2.3.3	Características durabilidad del hormigón reciclado	30
2.3.3.1	Absorción de agua	30
2.3.3.2	Permeabilidad al aire	30
2.3.3.3	Carbonatación	31
2.3.3.4	Succión capilar	30
2.3.3.5	Congelación y deshielo	31
2.3.3.6	Ingreso de cloruros	33
2.4	Mejoras en la calidad del hormigón reciclado	33
2.5	Conclusiones	36
2.6	Referencias	38

CAPÍTULO 3: PROCESO DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DEL HORMIGÓN

3.1	Introducción	44
3.2	Mecanismos desarrollados en el deterioro de las estructuras de hormigón, por corrosión de sus armaduras	44
3.3	Control de la corrosión	49
3.4	Factores desencadenantes de la corrosión. Tipos de corrosión de las armaduras	50
3.4.1	Carbonatación	50
3.4.2	Corrosión por iones de cloruro	53

3.5	Otros factores desencadenantes de corrosión	57
3.6	Factores que controlan la cinética de la corrosión de las armaduras	57
3.7	Diagnóstico de las armaduras corroídas	61
3.8	Referencias	67

CAPÍTULO 4: GENERACIÓN, GESTIÓN Y POSIBILIDADES DE RECICLADO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

4.1	Introducción	70
4.2	Generación de RCDs	72
4.3	Producción de agregados reciclados	73
4.3.1	Procesos de producción de agregados reciclados	73
4.3.2	Demolición selectiva	76
4.3.3	Eliminación de impurezas	77
4.4	Trabajo de campo en la ciudad de bahía blanca	78
4.4.1	Método	78
4.4.2	Relevamiento de residuos de la construcción	78
4.4.3	Proporciones de los diferentes materiales	78
4.4.4	Cantidad de residuos de construcción generados	81
4.4.5	Ensayos no destructivos sobre elementos de hormigón	81
4.5	Resultados	82
4.5.1	Proporciones de los diferentes materiales	82
4.5.2	Cantidad de residuos de construcción generados	84
4.5.3	Ensayos no destructivos	85
4.5.3.1	Método esclerométrico	86
4.5.3.2	Método de la velocidad de propagación de ultrasonidos	86
4.6	Discusión	87
4.7	Actualidad del reciclado de hormigón en argentina	90
4.8	Aplicaciones del hormigón reciclado en el mundo	91
4.9	Normas y recomendaciones relacionadas con el hormigón reciclado	92
4.10	Recomendaciones sobre la gestión de residuos	94
4.11	Conclusiones	95
4.12	Referencias	96

CAPÍTULO 5: MEJORAS PROPUESTAS SOBRE EL HORMIGÓN RECICLADO

5.1	Consideraciones generales	98
5.2	Utilización de aditivos en la elaboración de hormigón reciclado	98
5.2.1	Introducción	98
5.2.2	Trabajo experimental	99
5.2.2.1	Elaboración de muestras	99
5.2.2.2	Materiales y mezclas	99
5.2.3	Resultados experimentales	101
5.2.4	Discusión	103
5.3	Tratamientos previos sobre el agregado reciclado	104
5.3.1	Tratamientos previos no simultáneos al mezclado	104
5.3.1.1	Introducción	104
5.3.1.2	Materiales y mezclas	105
5.3.1.3	Elaboración de muestras	107
5.3.1.4	Ensayo de resistividad	109
5.3.1.5	Resultados	110
5.3.1.6	Discusión	112
5.3.2	Variantes del tratamiento previo con lechada de cemento	112
5.3.2.1	Introducción	112
5.3.2.2	Materiales y mezclas	113
5.3.2.3	Elaboración de muestras	116
5.3.2.4	Resultados	116
5.3.2.5	Discusión	119
5.3.3	Tratamientos previos simultáneos al mezclado	120
5.3.3.1	Introducción	120
5.3.3.2	Materiales y mezclas	121
5.3.3.3	Tratamientos previos	123
5.3.3.4	Elaboración de muestras y ensayos	124
5.3.3.5	Resultados	125
5.3.3.6	Discusión	127
5.4	Análisis económico de los diferentes tratamientos	128
5.4.1	Discusión	130
5.5	Conclusiones	130
5.6	Referencias	133

CAPÍTULO 6: CORROSIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN RECICLADO

6.1	Consideraciones generales	135
6.2	Proceso de corrosión acelerada	135
6.2.1	Introducción	137
6.2.2	Ensayos	138
6.3	Influencia del espesor del recubrimiento en la corrosión de armaduras en hormigones reciclados	140
6.3.1	Introducción	140
6.3.2	Trabajo experimental	140
6.3.2.1	Materiales y mezclas	140
6.3.2.2	Elaboración de muestras	141
6.3.2.3	Metodología experimental	142
6.3.3	Resultados y discusión	142
6.3.3.1	Caracterización	142
6.3.3.2	Potenciales de corrosión	143
6.3.3.3	Fisuración	144
6.3.3.4	Resultados gravimétricos	146
6.4	Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón Reciclado con Tratamientos Previos	148
6.4.1	Introducción	148
6.4.2	Trabajo experimental	149
6.4.2.1	Materiales y mezclas	149
6.4.2.2	Elaboración de muestras	150
6.4.2.3	Metodología experimental	151
6.4.3	Resultados y discusión	152
6.4.3.1	Caracterización	152
6.4.3.2	Potenciales de corrosión	152
6.4.3.3	Fisuración	153
6.4.3.4	Resultados gravimétricos	155
6.5	Análisis dinámico de elementos estructurales de hormigón reciclado con sus armaduras en proceso de corrosión	157
6.5.1	Introducción	157
6.5.2	Trabajo experimental	158
6.5.2.1	Características de las muestras	158
6.5.2.2	Medición de las frecuencias naturales	159

6.5.3	Resultados y discusión	160
6.6	Conclusiones	163
6.7	Referencias	165

CAPÍTULO 7: TRATAMIENTOS PREVIOS CON MEJOR DESEMPEÑO

7.1	Consideraciones generales	167
7.2	Trabajo experimental	168
7.2.1	Materiales y mezclas	168
7.2.2	Elaboración de muestras	171
7.2.3	Metodología experimental	171
7.3	Resultados y discusión	172
7.3.1	Caracterización	172
7.3.2	Potenciales de corrosión	174
7.3.3	Fisuración	175
7.3.4	Resultados gravimétricos	176
7.4	Conclusiones	177
7.5	Referencias	180

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

8.1	Síntesis	181
8.2	Conclusiones generales	185
8.3	Propuestas para futuros trabajos	186

APÉNDICES

A	Lugares de vertido de desechos de construcción y demolición (Capítulo 4)	187
B	Información adicional sobre agregados y materiales obtenidos (Capítulo 5 a 7)	188
C	Elaboración de hormigón reciclado (Capítulo 5 a 7)	190
D	1 Fotos vigas fisuradas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)	192
	2 Esquema de ataque corrosivo en vigas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)	194
E	1 Fotos vigas fisuradas (diferentes tratamientos previos) (Capítulo 6)	196
	2 Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 6)	199
F	1 Fotos vigas fisuradas (Capítulo 7)	202
	2 Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 7)	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2

2.1	Partículas que componen el agregado reciclado	13
2.2	Elementos constitutivos e interfases del hormigón reciclado.....	21
2.3	Comparación de consistencia entre el hormigón reciclado y el convencional.....	22
2.4	Procedimientos de mezclas: en forma tradicional y en dos etapas (TSMA)	35
2.5	Estructura del RA antes y después de adoptar la mezcla en dos etapas TSMA	36

Capítulo 3

3.1	Esquema general del proceso de corrosión	45
3.2	Celda simplificada de corrosión en hormigón armado	46
3.3	Volumen de los distintos compuestos formados durante la oxidación del hierro.....	47
3.4	Fisuración del recubrimiento del hormigón, por la formación de productos de corrosión.....	47
3.5	Esquema del proceso de carbonatación del hormigón (profundidad de carbonatación).....	51
3.6	Tipos de corrosión de las armaduras	54
3.7	Esquema del fenómeno electroquímico de la Corrosión por Cl ⁻	56
3.8	Vida útil de las estructuras. de hormigón armado en función de la corrosión de su armadura	58
3.9	Diagrama de Evans (Influencia del control mixto, catódico y anódico en la velocidad de corrosión). (A): curva de polarización anódica; (C): curva de polarización catódica.....	59
3.10	Esquema de medición de Potencial Electroquímico	64
3.11	Curva de extrapolación de Tafel	66

Capítulo 4

4.1	Porcentaje de RCDs reciclado sobre el porcentaje de RCDs producido.....	73
4.2	Representación esquemática de plantas de producción de agregados reciclados.....	74
4.3	Trituradora de rodillos	75
4.4	Trituradora de Impacto	75
4.5	Trituradora de mandíbulas.....	75
4.6	Trituradora de Conos	76
4.7	Fotografías en lugares de vertido de residuos de construcción y demolición relevados.....	79
4.8	Ubicación de los vertederos de inertes en la ciudad de Bahía Blanca.....	81
4.9	Ensayos no destructivos sobre elementos de hormigón.....	82
4.10	Porcentaje de cada tipo de material relevado.....	83
4.11	Esquema de proporciones de residuos gestionados.....	84

Capítulo 5

5.1	Esquema de los tratamientos previos realizados	108
5.2	Vistas del agregado de hormigón reciclado antes y después del tratamiento previo.....	108
5.3	Ensayo de absorción capilar (TP1)	117
5.4	Ensayo de absorción capilar (TP2).....	118
5.5	Ensayo de absorción capilar (TP3)	118
5.6	Esquema de tratamiento previo simultáneo y no simultáneo	124
5.7	Curvas de absorción capilar en función del tiempo de los distintos hormigones elaborados	125

Capítulo 6

6.1	Esquema de una viga durante el ensayo (dimensiones en cm).....	136
6.2	Medición del ancho de fisuras	139
6.3	Potenciales de corrosión en función del tiempo	143
6.4	Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Prof. Media de Ataque a las armaduras	144
6.5	Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras	145
6.6	Relación entre la Profundidad Media de Ataque a las Armaduras que produce la primer fisura visible ($e = 0,05\text{mm}$) y la relación recubrimiento / diámetro	145
6.7	Ensayo de corrosión acelerada efectuado sobre las vigas	151
6.8	Potenciales de corrosión en función de la Prof. Media de Ataque a las Armaduras	153
6.9	Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las Armaduras	154
6.10	Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras	154
6.11	Detalle de la viga y ubicación de la zona afectada por la corrosión	159
6.12	Esquema general del instrumental utilizado en el análisis dinámico	160
6.13	Variación de la Primer Frecuencia Natural de Vibración en función de la Profundidad Media del Ataque a las Armaduras para las Vigas 1 a 5	161
6.14	Variación de la Primer Frecuencia Natural de Vibración en función de la Prof. Media del Ataque a las Armaduras, en vigas elaboradas con diferentes tipos de hormigón	161

Capítulo 7

7.1	Ensayo de corrosión acelerada efectuado sobre las vigas	172
7.2	Potenciales de corrosión en función de la Prof. Media de Ataque a las Armaduras	174
7.3	Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las Armaduras	175
7.4	Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras	176

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

La presente Tesis Doctoral, de carácter experimental, parte del conocimiento actual aportado por numerosos investigadores, sobre las características y desempeño de los hormigones realizados con agregados reciclados (que se denominarán hormigones reciclados), y pretende, por un lado, ampliar conocimientos vinculados con la tecnología de estos hormigones e incorporar investigaciones relacionadas con la corrosión de armaduras en estructuras que utilicen este tipo de hormigones. Por otra parte, se busca explorar nuevas metodologías de fabricación del hormigón reciclado, con la finalidad de mejorar sus características durables, aportando nuevas temáticas sobre este tipo de hormigones, en la que no hay antecedentes de otras investigaciones.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El hormigón armado es uno de los materiales cuyo uso, a nivel internacional, está más difundido en la industria de la construcción y en nuestro país, es el más empleado con fines estructurales. Por diversos motivos, su durabilidad se puede ver afectada; uno de estos inconvenientes suele ser la corrosión de sus armaduras. Esta situación, inicialmente provoca fisuras en el recubrimiento de hormigón y la sección del acero disminuye. En la medida que avance este deterioro, se puede llegar al colapso de la estructura.

Cabe acotar, que las investigaciones sobre durabilidad, con una visión estructural son de interés, debido a que en los países desarrollados son crecientes las cifras que se invierten en el mantenimiento y reciclado de distintos tipos de obras, que están expuestas al deterioro producido por los agentes atmosféricos.

Como es de suponer, en nuestro país, esta problemática también tiene importancia y en particular, en la región de influencia de la Universidad Nacional del Sur, donde existen condiciones ambientales agresivas, debido a la proximidad del mar y a una zona industrial, donde está el Polo Petroquímico más importante del país.



Por otra parte, con el fin de ayudar a la sustentabilidad de las construcciones, se hace necesario reciclar materiales de construcción. En particular, en el hormigón, por ser el material de construcción más difundido en el mundo, es importante analizar su reuso, desde el punto de vista ambiental.

Por estos motivos, resulta importante desarrollar investigaciones que permitan predecir el comportamiento de estructuras de hormigón que tengan afectadas sus armaduras, por procesos de corrosión y que hayan sido realizadas con hormigones compuestos por materiales de reciclado.

1.3 LÍNEAS INVESTIGATIVAS DESARROLLADAS EN ESTA TESIS

1.3.1 GESTIÓN Y PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO

Los desechos de la industria de la construcción, son aquellos producidos en la construcción, renovación y demolición de edificios, estructuras y otras obras. En la mayoría de las ciudades de Argentina, estos desechos son eliminados en vertederos oficiales y un porcentaje importante en vertederos clandestinos, donde es habitual encontrarlos mezclados con residuos sólidos urbanos. Esto también ocurre en otros países, que han originado investigaciones al respecto [1,2], como así también, se han generado leyes que prohíben el funcionamiento de los vertederos clandestinos, delegándose a las administraciones locales la elaboración de ordenanzas y reglamentos relacionados con la gestión de dichos de residuos [3].

La generación de residuos de construcción y demolición es diferente de un país a otro [4,5], variando según el desarrollo económico, la conciencia ambiental y la dinámica y forma de construcción en cada uno de ellos, pudiendo variar desde 200 kg/hab/año hasta 3000 kg/hab/año. El reciclado de estos desechos, o al menos parte de ellos, es una herramienta de gestión ambiental usada en muchos países del mundo, como es el caso de Dinamarca, Alemania y otros, donde los porcentajes de reciclado son elevados [3]. En particular, el reciclado de desechos de hormigón, provenientes de demoliciones, es una alternativa ya aplicada y normalizada en varios países del mundo [6-12], aplicando límites de reemplazo y condiciones de utilización, dependiendo de los métodos y materiales de fabricación que emplea cada sitio en particular.



En base a estos conocimientos previos, en esta Tesis se presenta un estudio, en el que se determinaron las cantidades de residuos de construcción y demolición generados en la ciudad de Bahía Blanca, siendo esta una ciudad de tamaño medio, dentro de Argentina, y en particular, de los desechos de hormigón, lo que permite situar y comparar los resultados generados con los de otros lugares del mundo, realizando análisis sobre las cantidades, proporciones, gestión y posibilidades de reciclado del mismo, en el contexto de nuestro país.

1.3.2 MEJORAS SOBRE EL HORMIGÓN RECICLADO

El reciclado de materiales de construcción y demolición usados para la realización de nuevas obras, no sólo es una forma de conservar las materias primas, sino también de reducir el consumo de energía y por lo tanto, disminuir los costos de construcción [13]. Por este motivo y, esencialmente, por cuestiones ambientales, diversos investigadores han empleado con éxito los agregados reciclados de hormigón [14-16].

Como ya se indicó anteriormente, en la industria de la construcción, uno de los materiales más empleados, con fines estructurales, es el hormigón armado. Por otro lado, en los últimos años, el reciclado de este material, mediante la trituración de elementos de hormigón de demolición y su utilización como agregado grueso de un nuevo hormigón, ha tenido cada vez más aceptación para su implementación en estructuras resistentes. Por este motivo, se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre su utilización, ya sea como agregado fino o grueso, usado para la elaboración de un nuevo hormigón [17-20].

La estructura interna de los hormigones reciclados es más compleja que la de los hormigones convencionales, pues posee dos zonas de interfase: una entre agregado reciclado y la nueva pasta de cemento, y otro entre el agregado reciclado y el antiguo mortero adherido. Este mortero remanente adherido en el agregado reciclado, puede convertirse en una debilidad en el hormigón reciclado [21-26], pues posee una estructura de poros más abierta que el agregado natural, además presenta fisuras, ambas aumentan el consumo de agua, dejando menos agua remanente necesaria para la hidratación de la nueva interfase, generando un efecto negativo sobre la resistencia última del hormigón resultante.

Sin embargo, es importante mencionar, que la presencia del mortero adherido, brinda al agregado, mayor rugosidad superficial frente a otros agregados naturales, como en el caso del



canto rodado, permitiendo obtener mejoras en el comportamiento mecánico del nuevo hormigón, para ciertos porcentajes de reemplazo [27].

Una de las diferencias más notoria entre los agregados reciclados de hormigón y los naturales, es la absorción de agua, siendo más elevada en el primer caso, debido a la presencia del mencionado mortero adherido. Esto, se ve reflejado en la succión capilar, penetración de cloruros, y otros parámetros que afectan la durabilidad del hormigón [28], y en particular, favorecen al proceso de corrosión de las armaduras, objeto de estudio de esta Tesis.

Una de las líneas de investigación abordadas en esta Tesis busca mejorar las características de los hormigones elaborados con agregados reciclados de hormigón, y se presentan distintas variantes para la elaboración del mismo:

- Utilización de diferentes aditivos en la mezcla;
- Realización de tratamientos, previos al mezclado de materiales, sobre el agregado reciclado de hormigón; y
- Materialización de tratamientos, simultáneos al mezclado de los materiales, sobre el agregado reciclado de hormigón

En todos los casos, se analizan las propiedades del hormigón obtenido, como su Resistencia a Compresión, Resistencia a Tracción, Succión Capilar, Resistividad, entre otros.

1.3.3 CORROSIÓN DE ARMADURAS EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN RECICLADO

En la primera mitad del Siglo XX se intensificaron los estudios realizados in-situ y experimentales sobre la corrosión de las armaduras, en estructuras de hormigón armado, que llevaron a la redacción de diferentes recomendaciones y normas, a partir de la segunda mitad del Siglo XX [29-31]; en este sentido realizaron importantes aportes la Unión Internacional de Laboratorios de Ensayos de Materiales (RILEM) [32]. A partir de los años 90, se efectuaron una gran cantidad de trabajos, muchos de ellos en laboratorio [33-35].

Andrade M.C. y otros [36,37] y Rodríguez J. y otros [38] llevaron adelante estudios minuciosos sobre la influencia de diferentes variables: relaciones recubrimiento / diámetro de barras y agua / cemento, velocidad de corrosión, posición de la armadura, existencia de armadura transversal y el contenido de humedad del hormigón, sobre el proceso de corrosión



de las armaduras y en la fisuración del recubrimiento de hormigón. También se han realizado modelaciones numéricas, en general usando el Método de los Elementos Finitos, para predecir el proceso de fisuración del recubrimiento [39-40].

Fueron destacables los aportes realizados por Almusallam A.A. y otros [41] y Cairns J. y otros [42], que estudiaron la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón, mediante ensayos experimentales tipo Pull-Out. Mc Leish A. publicó [43] las principales causas que pueden afectar a la capacidad portante de elementos estructurales con armaduras corroídas. Uomoto T.Y. y Misra S. [44], efectuaron un trabajo experimental muy amplio ensayando vigas y columnas con sus armaduras corroídas. En estas investigaciones se indujo una corrosión acelerada, agregando cloruro de sodio al agua de amasado. Rodríguez J. y otros [45,46], efectuaron investigaciones con el objetivo de relacionar el nivel de corrosión de las armaduras, con la capacidad portante residual del elemento afectado y el comportamiento en servicio de vigas y columnas de hormigón deterioradas.

En todos los trabajos de laboratorio anteriormente referenciados, el deterioro de los elementos estudiados se produjo sin aplicar cargas externas (no es lo que en realidad ocurre en la mayoría de las estructuras). Son muy pocos los antecedentes encontrados, en donde los elementos estructurales estudiados estén solicitados mecánicamente, por ejemplo a esfuerzos de flexión [47]. Ortega N.F. y otros [48,49], realizaron trabajos donde estudiaron la corrosión en elementos de hormigón pretensado. Analizándose las pérdidas de adherencia entre las barras corroídas y el hormigón que las confinaba, se observaron importantes diferencias según la zona de la viga que estuviese afectada.

En la actualidad, se está considerando cada vez más, la importancia de los impactos ambientales de las construcciones, por ello, en distintos lugares, se ha trabajado en la incorporación de agregados reciclados al hormigón [50-52]. También se han realizado investigaciones sobre los parámetros durables del hormigón reciclado [51,53], pero no se han encontrado trabajos acerca del comportamiento de elementos de hormigón reciclado, sometidos a procesos de corrosión de sus armaduras.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y con el fin de establecer la influencia sobre el proceso de corrosión de las armaduras, ubicadas dentro de la masa de hormigones elaborados con agregado reciclado, en esta Tesis se presentan diversos estudios de corrosión

acelerada, sobre vigas construidas con agregados gruesos reciclados de hormigón, en las que se analizó la variación de diferentes factores:

- Relación recubrimiento / diámetro de las barras;
- Utilización de agregados reciclados de hormigón tratados con diferentes productos en forma previa al mezclado;
- Utilización de agregados reciclados de hormigón tratados con una lechada de cemento, en forma simultánea al mezclado; y
- Variación del porcentaje de reemplazo de agregado grueso natural, por agregado grueso de hormigón reciclado con tratamiento simultáneo al mezclado de materiales.

Se realizó el seguimiento de la fisuración del recubrimiento de hormigón, de los Potenciales de Corrosión y del deterioro de las armaduras una vez finalizados los ensayos. Se determinó la influencia de los factores mencionados, en los resultados del proceso de corrosión.

1.4 REFERENCIAS

- [1] Ashford S.A, Visvanathan C., Husain N., Chomsurin C., “Design and construction of engineered municipal solid waste landfills in Thailand.”, *Waste Management and Research*, 18, 2000, 462–470.
- [2] Padungsirikul P., “Sustainable solid waste landfill management research and development in Thailand.”, *Pollution Control Department of Thailand*, 2003.
- [3] Thongkaimook A., “3R Portfolio-good practices to promote the 3R’s. *Pollution Control.*”, *Department of Thailand, Ministry of Natural Resources and Environment Thailand*, 2005.
- [4] Brodersen, J., Juul, H., Jacobsen H., “Review of Selected Waste Streams: Sewage Sludge, Construction and Demolition Waste, Waste Oils, Waste from Coal-Fired Power Plants and Biodegradable Municipal Waste.”, *European Topic Centre on Waste European Environment Agency*, 2002.
- [5] N. Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al-Humoud J., “Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait.”, *Waste Management*, 24, 2004, 1049–1059.
- [6] Instrucción de Hormigón Estructural EHE - Anejo 15: “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados.”, 2008.
- [7] RILEM. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. “Specifications for concrete with recycled aggregates.”, *Materials and Structures*, 27, 1994, 557-559.
- [8] KASAI Y., “Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan.”, *Demolition and Teuse of Concrete and Masonry, Proceeding of the Third International RILEM Symposium*, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994, 93-104.
- [9] DIN 4226-100, “Aggregates for mortar and concrete – Part 100: Recycled aggregates”, 2000.
- [10] DIN 1045:2001, “Concrete, German code for the design of concrete structures”, 2001.

- [11] BS 8500-2:2006, “Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete”, 2006.
- [12] De Olivera M. J. E., Assis C. C., De Mattos J.T., “Recycled Aggregate Standarization in Brazil.”, Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universida de Taubaté, Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 2004.
- [13] Servas V., “Recycling concrete materials.”, Civil Engineering, 9, 1981, 45–53.
- [14] Lin Y. H., Tyan Y. Y., Chang T.P., Chang C. Y., “An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates.”, Cement and Concrete Research, 34, 2004, 1373–1380.
- [15] Sagoe-Crentsil K.K., Brown T., Taylor A.H., “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate.”, Cement and Concrete Research, 31, 2001, 707–712.
- [16] Poon C.S., Azhar S., Kou S.C., “Recycled aggregates for concrete applications, Materials Science and Technology in Engineering Conference.”, Now, New and Next , 2003.
- [17] Señas L., Priano C., Valea J., Cabo G., “Reciclado de hormigones de canto rodado patagónico.”, 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza, 2006.
- [18] Etxeberria M., Vázquez E., Mari A., Barra M., “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.”, Cement and Concrete Research, 37, 2007, 735–742.
- [19] Zega C.J., Villagrán-Zaccardi Y.A., Di Maio A.A., “Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates.”, Materials and Structures, 43, 2010, 1-2.
- [20] Cabrera O.A., Traversa L.P., Ortega N.F., “Effect or crushed sand on mortar and concrete rheology.”, Construction Materials, 61, 303, 2011, 401-416.
- [21] Alexander M.G., “The effects of ageing on the interfacial zone in concrete, Interfacial transition zone in concrete: state-of-the-art report.”, 1996, 150–174.
- [22] Jia W., Baoyuan L., Songshan X., Zhongwei W., “Improvement of paste-aggregate interface by adding silica fume.”, Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cement, 3, 1986, 460– 465.
- [23] Keru W., Jianhua Z., “The influence of the matrix-aggregate bond on the strength and brittleness of concrete, Bonding in Cementitious Composites.”, Materials Research Society, 114, 1988, 29–34.
- [24] Li G., Xie H., Xiong G., “Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders.”, Cement and Concrete Composites, 23, 4–5, 2001, 381–387.
- [25] Popovics S., “Attempts to improve the bond between cement paste and aggregate.”, Materials and Structures, 20, 115, 1987, 32– 38.
- [26] Xueqan W., Dongxu L., Qinghan B., Liqun G., Mingshu T., “Preliminary study of a composite process in concrete manufacture.”, Cement and Concrete Research, 17, 5, 1987, 709–714.
- [27] Zega, C.J., Di Maio, A.A., Taus, V.L., “Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado.”, Boletín técnico IIME, 44, 3, 2006, 17-26.
- [28] Olorunsogo F.T., Padayacheeb N., “Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes.”, Cement and concrete Research, 32, 2002, 179–185.
- [29] American Concrete Institute, “Corrosion of Metals in Concrete”, ACI, Detroit, 1978.
- [30] Grupo Español del Hormigón. GEHO-CEB, “ Durabilidad de Estructuras de Hormigón.”, Guía de Diseño CEB, Boletín 12, 1993.



- [31] National Cooperative Highway Research Program, Service Life of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Bridge Superstructure Elements, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2006.
- [32] Kropp J., Hilsdorf H.K., "Performance criteria for concrete durability.", RILEM Technical Committee TC 116-PCD Edited, E&FN Spon, London, 1995.
- [33] Calavera Ruiz J., "Patología de Estruct. Hormigón Armado y Pretensado.", Tomos I y II, INTEMAC, Madrid, 1996.
- [34] Durable Concrete Structures, Editor: Rostam S.; Comité Euro-Internacional Du Beton, 1992.
- [35] Mays, G., "Durability of Concrete Structures. Investigation, Repair, Protection.", E&FN Spon, London, 1992.
- [36] Andrade M.C., "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras.", Instituto E.Torroja, Madrid, 1989.
- [37] Andrade M.C., Alonso M.C., Molina F.J., "Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – Experimental test.", Materials and Structures, 26, 1993, 453-464.
- [38] Rodríguez J., Casal J., García A.M., Alonso C., Andrade C., "Evaluación experimental de la fisuración del hormigón producida por la corrosión de las armaduras.", Hormigón y Acero, 194. 1994, 29-42.
- [39] Burkan Isgor O., Ghani Razaqpur A., "Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures.", Cement & Concrete Composites, 26, 2004, 57-73.
- [40] Bhargava K., Ghosh A. K., Yasuhiro Mori, Ramanujama S., "Analytical model for time to cover cracking in RC structures due to rebar corrosion.", Nuclear Engineering and Design, 236, 2006, 1123-1139.
- [41] Almusallam A.A., Al-Gahtani A.S., Aziz A.R., Rasheeduzzafart H., "Effect of reinforcement corrosion on bond strength.", Construction and Building Materials, 10, 2, 1996, 123-129.
- [42] Cairns J., Du Y., Law D., "Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interface", Construction and Building Materials 21, 2007, 190-197.
- [43] Mc Leish A., "Structural assessment. Manual for life cycle aspects of concrete in building and structures.", Taywood Engineering Limited, UK. 1987, B4.1-B4.22.
- [44] Uomoto T., Misra S., "Behaviour of concrete beam and columns in marine environment when corrosion of reinforcing bars takes place.", ACI Special Publication SP-109, 1988, 127-145.
- [45] Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Arenas J.M., "Comportamiento estructural de vigas de hormigón con armaduras corroídas.", Hormigón y Acero, 200. 1996, 113-131.
- [46] Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Arenas J.M., "Estudio experimental sobre la capacidad portante de soportes de hormigón con armaduras corroídas.", Hormigón y Acero, 208. 1998, 49-61.
- [47] Francois R., Arliguie G., "Reinforced Concrete: correlation between cracking and corrosion.", Proceedings of Second International Conference of Durability of Concrete, Montreal, 1991, 1221-1238.
- [48] Ortega N. F., Alonso M.C., Andrade M.C., López C., "Análisis de la fisuración ocasionada por la corrosión de las armaduras activas de elementos pretensados.", Coloquia, Madrid, 2001.
- [49] Ortega, N.F., Alonso M.C., Andrade M.C., López C., "Fisuración de vigas con armaduras activas por efecto de la corrosión, en función de la resistencia del hormigón.", 16º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza, 2006.



- [50] Eguchi K., Teranishi K., Nakagome A., Kishimoto H., Shinozaki K., Narikawa M., “Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction.”, *Construction and Building Materials*, 21, 2007, 1542–1551.
- [51] Levy S.M., Helene P., “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development.”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, 1975–1980.
- [52] Rao A., Jha NK, Misra S., “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete.”, *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 2007, 71-81.
- [53] Olorunsogo F.T., Padayacheeb N., “Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes.”, *Cement and concrete Research*, 32, 2002, 179–185.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO



CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN RECICLADO

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La utilización de agregados reciclados para la elaboración de hormigón comenzó a tener aplicación al finalizar la Segunda Guerra Mundial. La gran cantidad escombros de demolición generados durante la misma, dio lugar a su reutilización, principalmente, como material de relleno. En particular, en los últimos tiempos, el hormigón de demolición, es uno de los materiales cuya reutilización ha tenido gran desarrollo en muchos países del mundo. El reciclado de materiales de construcción y demolición en la realización de nuevas obras, no sólo es una forma de conservar las materias primas, sino de reducir el consumo de energía y por lo tanto, disminuir los costos de construcción [1].

Muchos investigadores han aplicado con éxito los agregados reciclados de hormigón (al que se denominará agregado reciclado) en pavimentos y carreteras [2-4] o estructuras simples, fundaciones, y rellenos [5]. Sin embargo, la fabricación de hormigón estructural y su comportamiento en nuevas aplicaciones, aunque hasta ahora, en bajas proporciones de sustitución, está originando buenos resultados.

Debido a diversos factores como el ahorro económico, pero sobre todo, por el beneficio medioambiental que este proceso supone, el reciclado de hormigones ha tenido cada vez más aceptación para su utilización en estructuras resistentes. Por este motivo, se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre la utilización de los agregados reciclados, ya sea fino o grueso, para la elaboración de un nuevo hormigón, (al que se denominará hormigón reciclado). Sin embargo, la gran mayoría de estas investigaciones están destinadas a develar el comportamiento mecánico del hormigón elaborado en estas condiciones, para compararlo con las propiedades mecánicas de hormigones convencionales [6,7].

Por otro lado, se ha comprobado que gran parte de los problemas que experimentan las estructuras de hormigón, se deben a la falta de conocimiento acerca de los factores que afectan a su durabilidad. Por este motivo, es fundamental, la realización de investigaciones destinadas a conocer el comportamiento del hormigón elaborado con agregados de hormigón



reciclado, reduciendo las agresiones al ambiente. Frente a esta problemática, algunos investigadores ya han desarrollado estudios relacionados con la durabilidad del hormigón reciclado [8,9].

El estudio del hormigón reciclado, por su parte, presenta dificultades, pues se trata de un material con propiedades no totalmente homogéneas, las cuales dependen, por un lado, del mortero adherido al agregado grueso del viejo hormigón y por otro, de su procedencia. Esto se debe, en el primer caso, al grado de trituración y del manipuleo previo a su utilización; y en el segundo caso, al tipo y destino de estructura, calidad de hormigón, elaboración, curado, etc. Estas variables, hacen que la calidad del agregado reciclado a utilizar sea bastante aleatoria, por ello es necesario tenerlas en cuenta a la hora de realizar algún análisis sobre este tipo de materiales.

En el presente capítulo se detallan las propiedades físico-mecánicas y durables que presentan los agregados reciclados y los hormigones con ellos elaborados, en base investigaciones realizadas por diferentes autores sobre la temática.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO RECICLADO DE HORMIGÓN

Los agregados ocupan una gran parte del volumen de hormigón y sus propiedades influyen significativamente en las propiedades del hormigón. En el caso del hormigón reciclado no es sencillo predecir u obtener una determinada calidad, porque el origen del agregado reciclado, en general, es desconocido. La utilización de agregados reciclados plantea un desafío, debido a la variación del origen, mortero adherido e impurezas que puede tener.

2.2.1 MORTERO ADHERIDO

La diferencia principal entre los agregados reciclados y los naturales radica en el mortero adherido que incorporan los primeros, heredado del hormigón original del que proceden. La cantidad de mortero adherido hace que los agregados reciclados presenten propiedades distintas a los naturales, que se reflejan en un aumento de la absorción de agua, menor densidad, menor resistencia, menor dureza y una menor resistencia a la fragmentación. El hormigón fabricado con ellos estará directamente condicionado por dichas propiedades.

Se han propuesto diferentes procedimientos para evaluar estas cantidades de mortero adherido [10-12] o estimarse el volumen del mismo [13-15]. En la Tabla 2.1, se observa cómo difiere la cantidad de mortero adherido en los agregados reciclados según diversos autores. En todos los casos se aprecia un incremento de dicha cantidad conforme disminuye el tamaño máximo del agregado. La calidad del hormigón de origen no tiene gran influencia en la cantidad de mortero adherido [10,16,17], observándose porcentajes ligeramente mayores en aquellos agregados que proceden de hormigones con resistencias elevadas. Sin embargo, está sujeta a la forma de trituración adoptada [18-20,24] y su reducción puede lograrse mediante trituraciones sucesivas.

Tabla 2.1: Mortero adherido en agregados reciclados según diversos autores.

Referencia	Mortero adherido	Tamaño agregado
Yagishita 1993 [12]	40,2 (a /c = 0,45)	10 / 20 mm
Ravindrarajah 1987 [14]	54 % (a/c = 0,51)	5 / 37,5 mm
Barra M. 1996 [21]	51,7 %	12/ 20 mm
	52,9 %	6 / 12 mm
Sánchez M. 2005 [35]	30,8 %	4 / 16 mm
Nagataki 2000 [37]	52,3 %	AG
Ravindrarajah 1988 [38]	20%	20 / 30 mm
	45-65 %	< 0,30 mm
Vázquez E. 2002 [89]	40,5 %	10 / 20 mm
	49,5 %	5 / 10 mm

2.2.2. ASPECTO Y COMPOSICIÓN

De acuerdo a lo expresado anteriormente, las partículas de agregados reciclados de hormigón se componen de roca natural y mortero, pertenecientes al hormigón de origen; ambos componentes pueden estar adheridos entre sí (en distintas proporciones) o bien el mortero puede constituir una partícula por separado. Las distintas variantes posibles se aprecian en la Figura 2.1. Estas particularidades le brindan un aspecto visual, que difiere significativamente al de un agregado natural. Los agregados reciclados presentan formas angulosas, debido al proceso de trituración y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero adherido a ellos.

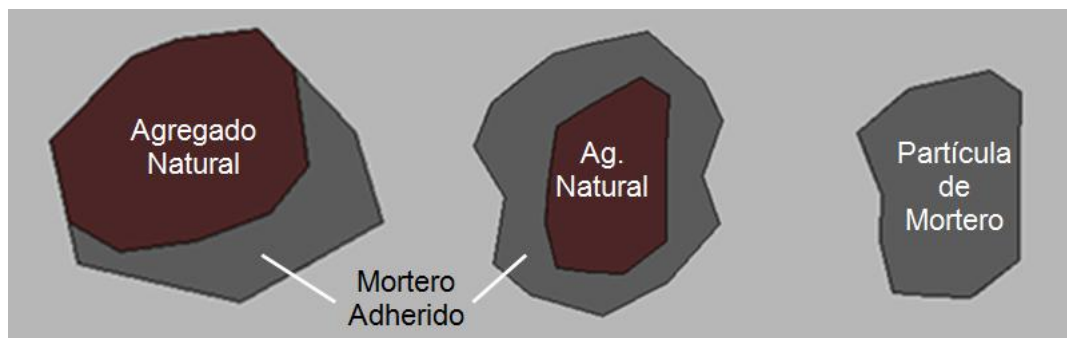


Figura 2.1: Partículas que componen el agregado reciclado. Aclarar que es cada cosa

Existen distintos procedimientos para evaluar las cantidades de mortero adherido a las partículas de agregado grueso reciclado [13,21,37].

2.2.3 FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL

El mortero adherido a las partículas de agregado natural produce un cambio en la forma de las partículas de los agregados reciclados, reduciendo los valores del índice de lajas y aumentando los índices de elongación respecto a los agregados naturales [25,26]. Esto se atribuye al hecho que los agregados gruesos reciclados se obtienen de la trituración de hormigones, cuyos planos de debilidad (interfases) no presentan una orientación definida, provocando que los agregados reciclados adquieran bajos porcentajes de partículas lajosas. Esto no ocurre en ciertas rocas naturales, las cuales presentan planos de fractura orientados, los cuales, bajo un proceso de trituración, pueden generar cantidades considerable de partículas lajosas [27,28].

Además, la presencia de mortero adherido también es causante que las partículas presenten, generalmente, una textura más rugosa y porosa que la de los agregados naturales debido a la superficie del hormigón de origen. Estas circunstancias hacen que los hormigones que se fabriquen con ellos presenten problemas de trabajabilidad.

La forma de las partículas se ve directamente afectada por el sistema de trituración empleado en la obtención del agregado reciclado [29]. Las trituradoras de mandíbulas proporcionan agregados reciclados con un coeficiente de forma más adecuado que las trituradoras de impactos o de conos.



2.2.4 GRANULOMETRÍA

La granulometría del agregado reciclado depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado para su obtención. Las trituradoras de impacto permiten alcanzar tamaños más reducidos de los agregados, produciendo como consecuencia mayor cantidad de finos. A estas trituradoras las siguen las de conos, con una producción de finos inferior y las trituradoras de mandíbulas.

La cantidad de agregado grueso reciclado generado oscila entre el 70% y el 90% de la producción [30]. Por lo general, esta fracción gruesa se ajusta a los requerimientos que exigen las normativas vigentes, quedando enmarcada dentro de los límites granulométricos de referencia, establecidos en ellas [18,31]. Es evidente que el tamaño obtenido en la trituración depende parcialmente del tamaño que tenía el agregado del hormigón de procedencia. Otras investigaciones indican que a medida que disminuye la resistencia del hormigón de origen triturado, es mayor la cantidad de agregado fino reciclado ($< 4,75$ mm) obtenido [31], esto estaría ligado al menor contenido de cemento y mayor proporción de arena que se utiliza en los hormigones de menor calidad.

Por otro lado, las curvas granulométricas del agregado fino reciclado que se obtienen a partir de la trituración, quedan en su mayor parte, fuera de los límites establecidos por las normas, para las arenas naturales. Esto se debe, a que tiene características similares a las arenas de trituración, partículas angulosas y un elevado contenido de polvo [32]. Por lo tanto, su utilización como agregado de hormigones estructurales está más limitada [33].

Por otro lado, el agregado reciclado sufre una disgregación durante el transporte y almacenamiento, una vez cribado se siguen obteniendo porcentajes muy reducidos de arena, debido a su mayor fragilidad [34]. Dichos valores oscilan entre el 0,5% y el 2% [35]. Esta fracción fina se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero, influyendo negativamente en las propiedades del hormigón.

2.2.5 DENSIDAD

La densidad del agregado reciclado es inferior a la del agregado grueso natural, debido a la pasta de mortero que queda adherida en las partículas y al contenido de impurezas que posee menor densidad [20,36].

Uno de los factores más influyentes en la densidad del agregado grueso reciclado es el proceso de producción del agregado. La utilización de trituradoras de impactos, implica la obtención de agregado grueso reciclado con una densidad superior que en los casos en los que se emplea una trituradoras de conos o de mandíbulas [29]. Esto se debe a que la trituradora de impactos elimina mejor el mortero adherido en el agregado grueso natural.

La calidad del agregado grueso reciclado es mayor, cuando se utiliza, en el proceso de producción, la combinación de varias trituradoras diferentes, ya que se consigue reducir en mayor proporción la cantidad de mortero adherido a los agregados originales. Así, en la bibliografía consultada [37] dichos agregados alcanzan un valor correspondiente al 90% de la densidad del agregado natural, después de haberlos sometido a dos etapas sucesivas de triturado, mediante machacadora de mandíbulas y trituradora de impactos. Dicho valor alcanza el 95%, cuando son cuatro las etapas de trituración.

Según diversos estudios, la densidad en las fracciones más gruesas del agregado reciclado es algo mayor que en las fracciones finas [18,20]. Dichos valores pueden presentar gran disparidad, inclusive se han hecho investigaciones en los que se contradice tal afirmación, obteniendo valores superiores de densidad en las fracciones de menor tamaño del agregado reciclado [26,38,39]. Sin duda, se debe a la distinta naturaleza de los agregados naturales con los que se fabricaron los hormigones originales. En la Tabla 2.2 se resumen los valores de densidad de diversos estudios consultados.

La calidad del hormigón de origen del agregado reciclado puede influir levemente en la densidad del mismo, pero no es tan predecible esta influencia debido a que, por un lado, en aquellos hormigones de menor calidad, los cuales presentan una menor relación agregado grueso/agregado fino y un mayor contenido unitario de cemento, el agregado grueso reciclado obtenido adquiere mayor cantidad de mortero adherido y por ende, posee menor densidad. [45]; pero por otro lado, durante el proceso de trituración, el mortero se desprende con mayor

facilidad de los hormigones con menor resistencia y en consecuencia, los agregados gruesos reciclados que provienen de hormigones con menor resistencia presentan menor contenido de mortero [41].

Tabla 2.2: Densidad de los agregados gruesos reciclados comparados con los naturales según diversos autores.

Referencia	Densidad	
	Agregado Reciclado	Agregado Natural
Poon C. S. 2002 [4]	2.470 – 2.350	2.570
Nixon 1993 [11]	2.430 – 2.320	2.630
Barra 1996 [21]	2.350 – 2.320	2.680 – 2.660
Katz 2003 [23]	2.450 – 2.400	-
Ravindrarajah 1985 [31]	2.490	2.670
Nishbayashi 1988 [71]	2.430 – 2.320	2.700
Sánchez M. 2005 [35]	2.160 – 2.340	2.600 – 2.610
Kashino 1988 [88]	2.420 – 2.380	-
Park 1999 [91]	2.630 – 2.390	2.650
Rasheeduzzafar 1984 [90]	2.280	2.550

2.2.6 ABSORCIÓN DE AGUA

Los valores de absorción de agua que alcanzan los agregados reciclados son muy superiores a los obtenidos en los agregados naturales. Como sucede con la densidad, se debe a la presencia de mortero adherido en dichos agregados [18,31]. En agregados gruesos naturales los valores de la absorción en general no superan el 2%, mientras que en diferentes estudios de agregados gruesos reciclados, se han observado valores que van desde un 3,3% hasta un 13%.

El tamaño del agregado grueso reciclado tiene gran influencia sobre la absorción. En las fracciones más finas, la cantidad de mortero adherido es superior que en fracciones más gruesas, y por lo tanto, la absorción es mayor, siendo más notorio dicho efecto cuanto menor sea la densidad del agregado reciclado [42]. Para una misma calidad de hormigón, las

absorciones de los agregados reciclados aumentan al disminuir el tamaño de partícula evaluado [18,20,38,41].

Esta propiedad también dependerá de la condición inicial de humedad en que se halle el agregado y del tiempo en que el mismo permanece en contacto con el agua, una vez transcurridas 24 horas, la absorción sigue presentando valores claramente diferenciados, según el tamaño del agregado reciclado, en densidades bajas, y dicha diferencia prácticamente se anula para densidades más elevadas [42].

También, el sistema empleado en el procesado de los residuos de construcción y demolición (RCDs) para la obtención de agregados reciclados permite reducir la absorción, ya que a medida que los RCDs pasan por diferentes trituradoras la cantidad de mortero adherido a los agregados disminuye.

Cuando los agregados gruesos reciclados proceden de hormigones que presentaban resistencias elevadas la absorción es menor que en los de resistencias más baja [11,13,43,44]. En la Tabla 2.4 se muestran los valores obtenidos para la absorción del agregado grueso natural según distintas investigaciones.

Tabla 2.4: Absorción de los agregados gruesos reciclados y agregados gruesos naturales

Referencia	Absorción (%)	
	Agregado Reciclado	Agregado Natural
Poon C. S. 2002 [4]	7,60	1,25
Ravindrarajah 1985 [31]	5,68	0,30
Barra 1996 [21]	7,49 – 6,85	0,8 - 0,5
Sánchez M. 2005 [35]	6,10	1,99
Katz 20003 [23]	8 – 3,3	-
Nishbayashi 1988 [71]	8,1 – 6,8	-
Kashino 1988 [88]	5,98-5,47	-
Rasheeduzzafar 1984 [90]	8,51	4,11
Park 1999 [91]	4,8 – 3,8	0,5

2.2.7 RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN

Una forma muy utilizada para la caracterización de los agregados gruesos para hormigones es el ensayo de desgaste por abrasión “Los Ángeles”. Los ensayos de pérdida por desgaste “Los Ángeles” en agregados gruesos reciclados presentan valores superiores debido a que en dicho ensayo no solamente se produce la correspondiente pérdida de peso del agregado natural, sino también la correspondiente a la eliminación parcial del mortero adherido.

En las fracciones más finas el coeficiente de Los Ángeles es mayor debido a que, como ya se ha comentado con anterioridad, el porcentaje de mortero adherido es mayor [10,43].

Mediante el empleo de trituraciones sucesivas se logra mejorar la calidad del agregado grueso reciclado y obtener pérdida por desgaste “Los Ángeles” con valores más próximos a los del agregado grueso natural. También influye en este coeficiente, la calidad del hormigón del que proceden los agregados reciclados, observándose que, al aumentar la resistencia, el valor del coeficiente de Los Ángeles disminuye [37,43]. En la tabla siguiente se muestran valores para dicho coeficiente obtenidos en diversas investigaciones.

Tabla 2.5: Desgaste “Los Ángeles” en agregados reciclados según diversos autores

Referencia	Tamaño agregado	Desgaste “Los Ángeles” (%)	
		Agregado Natural	Agregado Reciclado
Barra 1996 [21]	20/12 mm	24,7	31
Sánchez M. 2005 [35]	4/16	35,8	38,9
Nishbayashi 1988 [71]	37,5/5 mm	18,1	37
Yamoto 2000 [92]	-	19,4	30,1
González B. 2002 [93]	25/12	27	34

En algunas investigaciones, se ha detectado un mayor valor de desgaste cuanto menor es la calidad del hormigón de origen del agregado reciclado [18,26,43]. Contrariamente, en otro estudio, se indican pérdidas de peso por desgaste, independientes de la calidad del hormigón original [31].

2.2.8 DURABILIDAD POR ATAQUE CON SULFATO DE SODIO

El método utilizado para determinar la durabilidad de los agregados reciclados, frente al ataque por sulfato es el especificado en la Norma ASTM C 88 [96], en el cual no se evalúa el ataque por sulfato de sodio propiamente dicho, sino que se analiza la resistencia del material frente a la presión que ejerce el sulfato al cristalizarse. Según diversos investigadores [46,47], las pérdidas obtenidas en los agregados gruesos reciclados resultan, en todos los casos, superiores a las determinadas en los agregados gruesos naturales.

aclarar que el ensayo

2.2.9 CONTENIDO DE POLVO

El límite establecido en el Reglamento Argentino [48], para contenido de polvo ($<75 \mu\text{m}$) es de 1,5 %, el cual está indicado para agregados gruesos naturales de trituración. Los agregados gruesos reciclados, si bien presentan valores superiores a los naturales, en la mayoría de los casos mencionados en distintas investigaciones [36,48,49], este valor ha estado por debajo del límite mencionado, e incluso del admitido por la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) que es del 1 %.

2.2.10 CONTENIDO DE CLORUROS

En los casos en los que el agregado reciclado tenga su origen en obras en las que hayan estado en contacto con sales fundentes o en contacto directo con agua del mar, o cuando en la fabricación del hormigón se empleó como aditivo algún producto acelerante, pueden presentar un importante contenido de cloruros. Si en cambio, no estuvieron sometidos a dichas condiciones, los valores de los cloruros solubles en agua y los cloruros totales oscilan entre el 0,001% y el 0,005% [15,50,51]. Es conveniente establecer no solo la cantidad de cloruros solubles en agua, sino también los cloruros totales que contiene el agregado, ya que pueden existir cloruros combinados que puedan ser reactivos, como en el caso del cloro aluminato cálcico hidratado que puede liberar los iones cloruros ante la presencia de iones sulfatos.

En aquellos países en los que existen recomendaciones para el empleo de agregados reciclados, se establecen las mismas limitaciones que para agregados naturales [52].

2.2.11 CONTENIDO DE SULFATOS

El contenido de sulfatos en los agregados reciclados puede ser importante, debido a la suma de los correspondientes al agregado natural con los del mortero adherido al mismo, ya que puede existir presencia de yeso como contaminante, en el caso de hormigones procedentes de edificaciones.

Dichos sulfatos pueden provocar problemas en el hormigón, como fuertes expansiones, ya que es posible su combinación con el aluminato tricálcico hidratado del cemento, formando ettringita (sulfoaluminato tricálcico hidratado). Otra posible transformación es la del hidróxido de calcio libre o liberado durante la hidratación del cemento en yeso, que conlleva igualmente, a un aumento de volumen que puede llevar a la rotura del hormigón.

Reduciendo la presencia de yeso en el agregado reciclado, al eliminar los tamaños más finos del mismo, se contribuye también a reducir la posibilidad de que dichas expansiones tengan lugar. La RILEM [52] establece un límite máximo, para agregados reciclados, del contenido de sulfatos solubles en ácido, del 1% cuando se empleen en la fabricación de hormigón.

2.2.12 REACCIÓN ÁLCALI - AGREGADO

Cuando los agregados utilizados en la fabricación del hormigón contienen sílice reactiva pueden reaccionar con los álcalis del cemento Portland, formando un gel que provoca expansiones peligrosas. La reactividad entre los álcalis y la sílice es proporcional a su hidratación. Las mayores expansiones se producen con una determinada cantidad de sílice reactiva. Si la cantidad está por encima o por debajo, dichas expansiones disminuyen.

Cuando se utilicen agregados reciclados en la fabricación de hormigón, es conveniente evaluar el contenido en álcalis que aportan [53]. Como el control de la procedencia de los agregados reciclados presenta dificultades y la utilización de cementos con adiciones de cenizas volantes o escorias disminuye la reacción álcali-agregado puede ser conveniente utilizar estos cementos en la fabricación de hormigón con agregados reciclados en los cuales se dude de su posible reactividad. Siempre es conveniente realizar un estudio petrográfico del material para evaluar la presencia de minerales reactivos.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

Como se mencionó anteriormente, las características que presentan los agregados gruesos reciclados lo diferencian de los agregados gruesos naturales en varios aspectos, por lo tanto, también se diferencian las propiedades físico-mecánicas y durables del hormigón obtenido utilizando al mismo como agregado.

El hormigón es un sistema trifásico conformado por: el agregado grueso, la matriz de mortero con agregado fino y la zona de interfase entre agregado grueso y la matriz de mortero [54-56]. En concreto, la zona de interfase entre la pasta de cemento y el agregado desempeña un papel crítico. A nivel macroscópico, el hormigón es un material compuesto que consta de agregados dispersos en una matriz de pasta de cemento [57]. Al igual que lo que ocurre con otros compuestos, el vínculo entre estos dos componentes principales del hormigón es determinante, en el rendimiento mecánico.

Aunque la interfase en sí es muy delgada, ocupa una proporción relativamente grande de la pasta de cemento. En un hormigón típico compuesto, el espacio promedio entre partículas es de 75 a 100 μm . Suponiendo un espesor de interfase de 40 μm , se estima que la misma representa entre un 20 % y un 40 % del volumen total de la matriz de cemento [58]. La debilidad de la zona interfacial inhibe el logro de la acción de composición, en condiciones normales de tensiones del hormigón [59]. Por lo tanto, la región interfacial es, generalmente, considerada como el eslabón débil de este tipo de hormigones [25-30].

De hecho, la estructura de los hormigones reciclados es mucho más complicada que la de los hormigones convencionales. El hormigón reciclado posee dos interfases, uno entre el agregado reciclado y la nueva pasta de cemento y otro entre el agregado reciclado y el antiguo mortero adherido, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2. El mortero remanente adherido en el agregado reciclado forma el eslabón débil en el hormigón reciclado, pues se compone de muchos microporos y microfisuras, y tiene un efecto crítico en la resistencia última del hormigón reciclado. Estos poros y fisuras aumentan el consumo de agua, quedando menos agua para la hidratación de la interfase del nuevo hormigón.

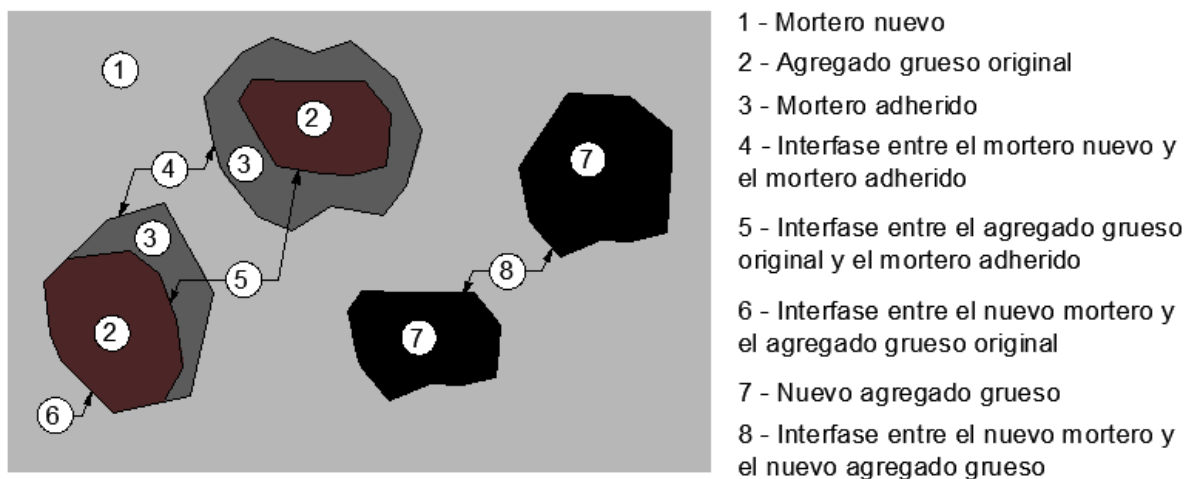


Figura 2.2: Elementos constitutivos e interfases del hormigón reciclado

2.3.1. ESTADO FRESCO

2.3.1.1 CONSISTENCIA

Cuando se fabrican hormigones con agregados reciclados, se aprecia un aumento de la consistencia, respecto a un hormigón elaborado en forma convencional, para una misma relación agua / cemento [17]. Los agregados reciclados presentan elevados valores de absorción, por lo tanto, la cantidad de agua absorbida por los agregados durante el proceso de amasado del hormigón será tanto más importante cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución. Como consecuencia se producirá una reducción de la relación agua/cemento efectiva y, por lo tanto, un aumento de la consistencia del hormigón fresco.

Además de la elevada absorción del agregado reciclado también pueden contribuir al incremento de la consistencia, otros factores como su textura rugosa o el cambio de la granulometría del agregado reciclado durante el proceso de amasado. En la Figura 2.3 puede observarse la evolución de la consistencia en un hormigón patrón y en otro fabricado con agregado reciclado. Cabe acotar que se ha utilizado la misma dosificación y la misma curva granulométrica para ambos hormigones [60].

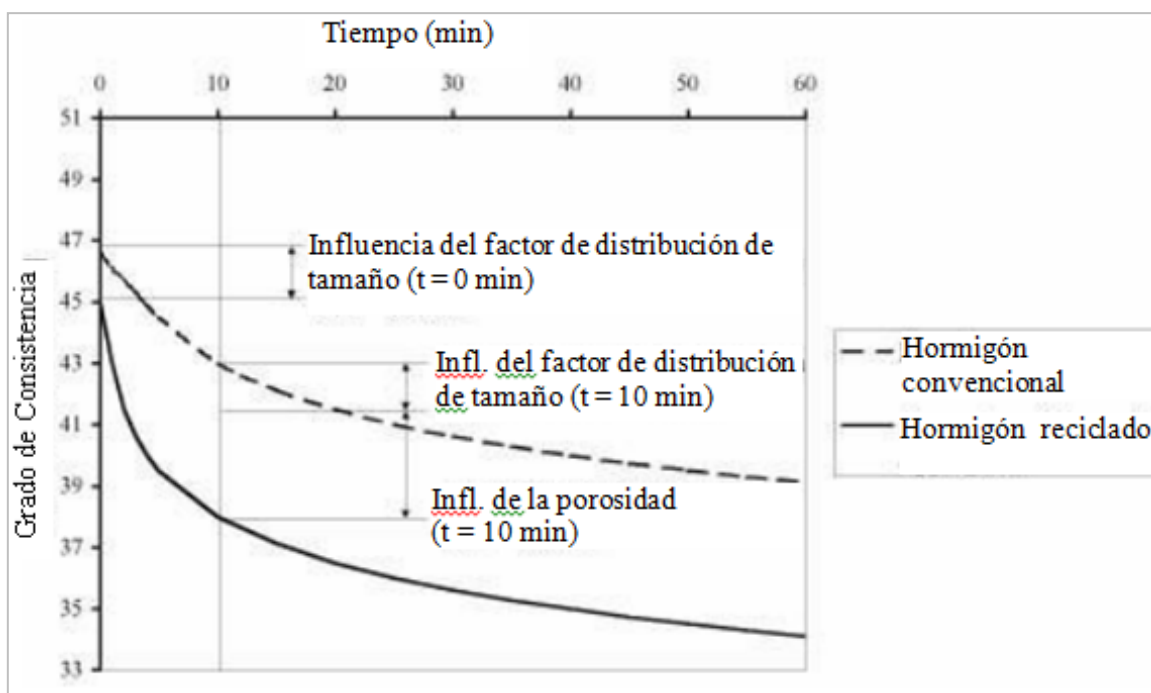


Figura 2.3: Comparación de consistencia entre el hormigón reciclado y el convencional [60]

Como puede observarse, el aumento en la consistencia es debido, en principio, al desprendimiento del mortero adherido al agregado. Después de transcurridos los diez primeros minutos la consistencia del hormigón aumenta considerablemente, a causa de la elevada absorción del agregado reciclado. A partir de entonces ambas curvas avanzan casi paralelamente.

En diferentes estudios realizados [18,31], se estableció que, cuando los agregados reciclados se emplean en la condición de humedad natural, es decir, secos al aire, fue necesario adicionar un contenido de agua extra a las mezclas, del orden de 10 a 15 l/m³, para obtener asentamientos semejantes a los de mezclas de similares características, elaboradas con agregados naturales. Para obtener una determinada consistencia puede procederse de varios modos:

1. Estimar la absorción efectiva del agregado reciclado, es decir la cantidad de agua que es capaz de absorber desde el estado de humedad natural hasta el de saturado y superficie seca y agregar esta cantidad como agua adicional al mezclado.
2. Saturar el agregado reciclado antes de proceder al amasado.
3. Utilizar un aditivo plastificante y/o superplastificante

La saturación del agregado reciclado, para la producción de hormigón a escala industrial, presenta problemas logísticos ya que en la planta de fabricación habría que disponer de las instalaciones adecuadas, que permitan sumergir los agregados que se encuentran en el acopio hasta lograr su saturación. En los trabajos consultados al respecto [61,62], puede observarse que en hormigones fabricados con agregado reciclado saturados previamente, la consistencia disminuye significativamente respecto a los mismos hormigones que incorporaban el agregado reciclado seco. En varios estudios el procedimiento adoptado se basa en saturar los agregados reciclados, durante 24 horas previas a su utilización, evitando de esta forma que absorban parte del agua de mezclado [63].

La utilización de aditivo superplastificante permite corregir la consistencia del hormigón, sin aumentar la cantidad de agua. Si bien hay un aumento en el costo de fabricación, puede verse compensado por la baja relación agua / cemento, en relación con los dos métodos anteriores, y el consiguiente aumento de la resistencia del hormigón [26,60].

El tipo de trituradora empleado también influye en la consistencia, debido a que generan agregados reciclados cuyas partículas presentan formas más o menos redondeadas. El empleo de agregados reciclados, cuyas partículas presentan formas llenas de aristas, proporciona hormigones de mayor consistencia que en aquellos en los que se utiliza agregados reciclados, cuyas formas son más redondeadas.

2.3.1.2 DENSIDAD

La densidad del hormigón fresco fabricado con agregados reciclados es inferior a la del hormigón convencional, debido a la menor densidad que presenta el agregado reciclado como consecuencia del mortero adherido a sus partículas. Estos valores de densidad resultan entre 50 y 150 kg/m³ inferiores a los obtenidos para hormigones convencionales [18,26,31], y serán inferiores cuanto mayor sea el porcentaje de reemplazo de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado [63].

2.3.1.3 AIRE NATURALMENTE INCORPORADO

Si bien algunos estudios realizados han determinado incrementos en la cantidad de aire ocluido en hormigones fabricados con agregado grueso reciclado [26], con variaciones entre

un hormigón patrón y otro reciclado, con similares características, la mayoría de ellos no presentan variaciones considerables [35,64].

2.3.1.4 EXUDACIÓN

Si el agregado grueso reciclado que se emplea en la fabricación de hormigón se utiliza previamente saturado, la exudación será similar a la de los hormigones convencionales. Si, por el contrario, el agregado reciclado se utiliza seco, la exudación del hormigón reciclado presentará valores muy por debajo de los correspondientes al hormigón convencional. Esto puede atribuirse a que la elevada absorción del agregado reciclado hace que el hormigón retenga mayor cantidad de agua [65].

2.3.2 ESTADO ENDURECIDO

2.3.2.1 DENSIDAD

La menor densidad del agregado grueso reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional. Este descenso de la densidad es prácticamente despreciable, cuando la sustitución del agregado grueso natural es del 20%.

Cuando la sustitución es del 50%, la densidad experimenta una reducción media del 2%. Dicha reducción llega a un valor medio del 3,5%, cuando el porcentaje sustituido de agregado grueso natural es del 100% [35]. Otros investigadores, encontraron, que la densidad del hormigón reciclado, con un reemplazo del 100% de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado, puede ser entre 10% y 20% inferior a la del hormigón convencional [66].

2.3.2.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con agregados reciclados disminuye con respecto a los convencionales, manteniendo en ambos la misma relación agua/cemento, siendo dicha disminución más significativa cuanto mayor sea el porcentaje de agregado grueso natural sustituido.

Las causas más influyentes en la reducción de la resistencia a compresión en los hormigones reciclados, son las siguientes:

1. La cantidad de mortero adherido a la matriz rocosa, que hace que el agregado grueso reciclado tenga una menor resistencia mecánica que el agregado grueso natural.
2. La mayor absorción de los agregados gruesos reciclados, pues esta característica hace que las mezclas recicladas generalmente se elaboran con mayor cantidad de agua. Por lo tanto, si bien consideran que la razón agua / cemento efectiva es igual en las mezclas de referencia y recicladas, la razón agua / cemento total es muy superior en los hormigones reciclados, lo cual puede ser motivo de la disminución en la resistencia a compresión.
3. El aumento de zonas débiles en la masa de hormigón endurecido al utilizar agregado grueso reciclado, ya que a la superficie de contacto entre los agregados gruesos naturales y el mortero adherido, se suma la superficie de contacto, más débil aun, existente entre los agregado grueso reciclado y el mortero nuevo.

La influencia del porcentaje de agregado grueso reciclado en la resistencia del hormigón es muy notable, como se puede apreciar en la Tabla 2.6. Según algunos estudios, efectuando hasta un 30 % de reemplazo del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado, la resistencia a compresión del hormigón reciclado resulta semejante a la del hormigón convencional [19,25]. Otras investigaciones, sin embargo, también encontraron comportamiento similares de resistencia a compresión con reemplazos del agregado grueso natural de hasta un 50% [68]. Cuando se reemplaza el 100% del agregado grueso, la resistencia a la compresión puede disminuir entre 10% y 20% [12,37,66,67].

También se ha encontrado, en estudios realizados en Argentina, que la resistencia a compresión de los hormigones reciclados es semejante a la de los hormigones convencionales hasta reemplazos del orden del 75 % [63,69,70], ya sea que los agregados gruesos reciclados provengan de hormigones previamente elaborados para tal fin o que hayan sido obtenidos a partir de la trituración de hormigones de procedencia desconocida.

Tabla 2.6: Resistencia a compresión del hormigón reciclado según diversos autores

Referencia	Resistencia a compresión (MPa)			% de sustitución	observaciones
	HC	HR	%Δ		
Kasai 1988 [40]	44-34	43-33	-2, -3	30% AG	-
	44-34	42-32	-5, -6	50% AG	-
	44-34	40-26	-10, -23	100% AG	-
Tavakoli 1996 [43]	33	33,5-32	-1,5, -3	100% AG	Aumenta contenido de agua y cemento
Mukai 1988 [94]	31,7	29,8	-6	100% AG Y AF	Aumenta contenido de agua y cemento
Kikuchi 1993[95]	40	38	-5	100% AG	Aumenta contenido de agua y cemento
	40	35	-12,5	30% AG y AF	
	40	38	-5	15% AG y AF	
Yanagi 1994 [96]	34	27,3	-20	100% AG	-

Otro aspecto importante a considerar, es la influencia que tiene la calidad del hormigón de origen sobre la resistencia a compresión del hormigón convencional. Estudios realizados sobre esta temática [18] encontraron que la resistencia a compresión de los hormigones reciclados resulta del mismo orden que la de los hormigones convencionales de igual nivel resistente que dieron origen a los agregados gruesos reciclados. Por el contrario, cuando la calidad del hormigón triturado es inferior a la del nuevo hormigón, la resistencia disminuye, haciéndolo en mayor medida cuanto menor es la relación agua / cemento de este último.

Otros estudios, contradicen lo expresado en el párrafo anterior, afirmando que la resistencia del hormigón que da origen al agregado reciclado no tiene influencia en la resistencia a compresión del nuevo hormigón, sino que la relación agua / cemento del nuevo mortero es quien gobierna esta característica [31].

Como era de esperar, el contenido de mortero adherido del agregado grueso reciclado también influye decisivamente sobre la resistencia a compresión del hormigón reciclado. La reducción de resistencia experimentada en un hormigón fabricado con agregado reciclado, que llevaba un 35,5% en peso de mortero adherido fue del 15%, mientras que en el mismo hormigón, fabricado con el mismo tipo de agregado reciclado pero conteniendo un 67,6% de mortero adherido, la caída de resistencia fue del 30% [71].

2.3.2.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN

Los estudios consultados proporcionan valores dispersos en la resistencia a tracción indirecta de los hormigones reciclados. Las pérdidas de resistencia son muy pequeñas [72] cuando el porcentaje de sustitución del agregado grueso natural es inferior al 50%. Si la sustitución del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado es del 100%, las pérdidas oscilan dentro rango comprendido entre el 6% y el 32% tal y como puede observarse en la Tabla 2.7

En algunos casos, se ha encontrado que la variación de la razón a/c tiene mayor influencia sobre la Resistencia a compresión que sobre la resistencia a tracción, y el hormigón reciclado se comporta de manera similar al convencional, ante dicha variación de la razón agua/cemento [31].

Algunas investigaciones indicaron una disminución de la resistencia a compresión de los hormigones reciclados, con relación a los convencionales de similares características, señalando las mismas conclusiones al determinar su resistencia a tracción indirecta [31].

Tabla 2.7: Variación de la resistencia a tracción en hormigones reciclados.

Referencia	Resistencia a tracción	
	% Sustitución	% de variación
Katz 2000 [31]	100% AG	-6
	20% AG	0
Sánchez M. 2005 [35]	50% AG	-1
	100% AG	-10
Di Niro 1996 [50]	50% AG y AF	-3,2
	100% AG	-31, -32
Yamoto 2000 [92]	100% AG	10, -20
González B. 2002 [93]	50% AG	1, -2
Hansen 1992 [95]	100% AG y AF	-20, -30

Otro factor que puede afectar la resistencia a tracción del hormigón reciclado es el tamaño máximo del agregado grueso. Algunos estudios, indican que en los hormigones reciclados la resistencia a tracción no se vio afectada por una variación del mismo, mientras que un mayor tamaño máximo provocó un leve incremento de la misma, en los hormigones convencionales [45]. Los valores de resistencia a tracción obtenidos fueron, en mayor parte, superiores en los hormigones reciclados que en los convencionales.

En los estudios que reflejan un aumento significativo de la resistencia a tracción [73], la relación agua/cemento efectiva se redujo en relación con la del hormigón patrón. La heterogeneidad en los resultados expuestos es debida a la variación en las condiciones de dosificación, consistencia o resistencia de los hormigones ensayados.

2.3.2.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN:

Las variaciones de la resistencia a flexión en los hormigones reciclados presentan oscilaciones, en función del porcentaje del agregado reciclado, similares a las experimentadas en la resistencia a tracción. Dichas reducciones son pequeñas, cuando la sustitución no es superior al 50% del agregado grueso natural. Al llegar a sustituir el 100% del agregado grueso natural, la reducción de la resistencia a flexión es más notable [14,44].

2.3.2.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO

Como se expresó anteriormente, los agregados reciclados están formados por una matriz rocosa y por pasta de cemento que los envuelve. El módulo de elasticidad de la pasta es inferior al del agregado natural y al del hormigón. Debido a esta circunstancia, los agregados reciclados presentaran un módulo de elasticidad inferior al de los agregados naturales y el módulo de elasticidad del hormigón reciclado será inferior al del hormigón convencional. Estos valores, por consiguiente también están fuertemente afectados por el tipo de agregado grueso que contenga el hormigón de origen. Además, la textura superficial más rugosa de los agregados reciclados y las pequeñas microfisuras que puede presentar el mortero adherido, hacen que el módulo de elasticidad se reduzca .

Los datos obtenidos de diferentes estudios consultados muestran que en hormigones con sustitución del agregado natural en un porcentaje que no sobrepase el 30%, la caída del valor del módulo se sitúa entre el 4% y el 10% [74]. Otros autores han indicado disminuciones del 8 al 15 %, en el valor del módulo estático de los hormigones reciclados respecto a los convencionales de igual resistencia, disminuyendo dicha diferencia al aumentar la resistencia de los hormigones [31]. Como es de esperar, la disminución del módulo de elasticidad será mayor cuanto más elevado sea el porcentaje de agregado grueso reciclado utilizado [63,69,70].

En la Tabla 2.8, se muestran valores del módulo de elasticidad del hormigón reciclado según investigaciones de diferentes autores.

Tabla 2.8: Valores del módulo de elasticidad en hormigones reciclados.

Referencia	Módulo de elasticidad hormigón reciclado	
	% Sustitución	% reducción
Topcu 1997 [7]	100% AG y AF	80
Ravindrarajah 1985 [31]	100% AG	30
	100% AF	20
	100% AG y AF	35
Sánchez M. 2005 [35]	20% AG	10
	50% AG	20
	100% AG	40
Nishbayashi 1988 [71]	100% AG	15 - 35
González B. 2002 [93]	50% AG	11
Hansen 1992 [95]	100% AG	15 - 50

2.3.2.6 RETRACCIÓN Y FLUENCIA

La retracción y la fluencia del hormigón reciclado se mantienen cuando el reemplazo del agregado grueso es inferior al 20%, mientras que con un reemplazo del 100% del árido grueso, la retracción puede aumentar hasta un 50% y la fluencia entre un 30-60%. Si se utiliza también agregado fino reciclado, ambos valores aumentan aún más [76].

2.3.3 DURABILIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO

2.3.3.1 ABSORCIÓN DE AGUA

Cuando en la elaboración de hormigón se utilizan agregados reciclados, la absorción de agua aumenta respecto a los hormigones convencionales, esto se mostró en diferentes investigaciones [25,74].

El aumento se hace más notable al incrementarse el porcentaje de sustitución. Los valores de dichos incrementos oscilan entre un 15% y un 70%. Si el porcentaje de sustitución del agregado grueso es inferior al 30% apenas se aprecian diferencias en los valores de la porosidad, y la absorción [44].



2.3.3.2 PERMEABILIDAD AL AIRE

Al igual que sucede con la absorción de agua, la permeabilidad al aire aumenta, cuando se utilizan agregados reciclados. Los valores de permeabilidad del hormigón reciclado, para distintos niveles de resistencia, llega a alcanzar valores que oscilan entre 2 y 7 veces la permeabilidad del hormigón patrón, cuando se sustituye el 100% del agregado grueso [19, 45].

2.3.3.3 CARBONATACIÓN

La carbonatación del hormigón está relacionada en forma directa con la permeabilidad al aire del mismo. Esta característica en los hormigones reciclados, se ve incrementada por la mayor porosidad del agregado reciclado.

Diferentes estudios sobre la carbonatación en hormigones reciclados muestran distintos resultados. En un estudio realizado en Japón [22], los hormigones con agregado reciclados presentaron una profundidad del frente de carbonatación superior en un 65% al del hormigón convencional. Otros autores [19,61] encontraron diferencias despreciables en la profundidad del frente de carbonatación entre hormigones reciclados y convencionales. Por su parte, Kasai y otros [40] obtuvieron un incremento del frente de un 20% y Teranishi [76,125], del 50% respecto del hormigón patrón.

Observando los resultados anteriores, se puede afirmar que al sustituir el agregado grueso natural, por agregado grueso reciclado en pequeños porcentajes, la profundidad de carbonatación en los hormigones prácticamente no aumenta. Cuando los porcentajes de sustitución sean mayores la profundidad del frente de carbonatación se hace mayor en los hormigones reciclados.

2.3.3.4 SUCCIÓN CAPILAR

Los hormigones reciclados poseen mayores valores de absorción capilar que los hormigones convencionales [23,46,69,70], esto implica que la penetración de líquidos hacia el interior del hormigón es más rápida, por lo tanto este tipo de hormigones es más vulnerables al ataque de agentes exteriores.

Por otro lado, el curado del hormigón tiene mucha influencia sobre este aspecto, pues la ausencia de un tratamiento de curado adecuado elevó la velocidad de succión capilar de los hormigones reciclados, sobre todo cuando los porcentajes de reemplazo del agregado grueso natural por agregado grueso reciclado son importantes [46]. También se observó a medida que aumenta la resistencia del hormigón (menor relación agua/cemento), la diferencia de los valores de succión capilar entre hormigones reciclados y convencionales es cada vez menor.

2.3.3.5 CONGELACIÓN Y DESHIELO

La mayor porosidad de los hormigones reciclados, los hace más permeables y más susceptibles al ingreso de agentes agresivos.

Dillmann [77], desarrolló una investigación en la que se analizaron los efectos sobre la resistencia original del hormigón, elaborado con agregado reciclado (fino y grueso), frente a ciclos de congelamiento y deshielo. Se pudo observar que existe una disminución importante, en los hormigones reciclados, de los niveles de resistencia, después de ser sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo.

Hosokawa et al. [78] investigaron la influencia de la cantidad de mortero adherido al agregado grueso reciclado, sobre la resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo. En este caso, no se manifestó un efecto claro de la proporción de mortero adherido sobre la resistencia al congelamiento y deshielo del hormigón reciclado. Esto implica que si la calidad del hormigón original es lo suficientemente alta, el mortero adherido no es un factor que influye negativamente en la resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo. Kawamura y Torii [80] recomiendan reducir el contenido de mortero adherido al agregado grueso original, tanto como sea posible, para que el comportamiento del agregado grueso reciclado ante ciclos de congelamiento y deshielo sea más satisfactorio.

Otros estudios [79] concluyeron con sus investigaciones, que la resistencia al congelamiento y deshielo varía en función del tipo de agregado grueso original. El agregado reciclado que contiene una piedra susceptible a ciclos de congelamiento y deshielo tiene mejor desempeño como agregado grueso en el nuevo hormigón, que el hormigón convencional en el que se utiliza dicha piedra como agregado.

Kasai et al. [40] mostraron que la resistencia al congelamiento y deshielo es menor, a medida que el porcentaje de reemplazo de agregado grueso por agregado reciclado aumenta. Por este motivo los autores no recomiendan utilizar hormigón reciclado, donde los ciclos de congelamiento y deshielo son severos.

Yamato et al. [81] investigaron la resistencia al congelamiento y deshielo de los hormigones elaborados con agregados reciclados, producido en una planta de reciclaje. Los autores concluyeron que la resistencia al congelamiento y deshielo del hormigón reciclado era inferior a la del hormigón patrón, pero para sustituciones de agregado reciclado menores al 30%, la reducción de esta característica es pequeña.

2.3.3.6 INGRESO DE CLORUROS

El ingreso de cloruros, está relacionado con la permeabilidad del hormigón. Uno de los métodos para evaluar la durabilidad del hormigón en este aspecto, es el que evalúa el ingreso de cloruros a través del mecanismo de difusión, como consecuencia de un gradiente de concentración entre la atmósfera exterior y la solución de poros del hormigón

Algunas investigaciones mostraron que cuando se sustituye un 100% del agregado natural por agregado reciclado, tanto la porción gruesa como la fina, el coeficiente de difusión del hormigón reciclado es el doble que en el hormigón convencional [53], mientras que al sustituir únicamente el agregado grueso, dicho valor se incrementa en un 30%.

Otros autores [15,82] han obtenido, para el proceso de difusión de cloruros en ambiente marino, resultados similares, tanto en hormigones reciclados con sustituciones de hasta el 75% como en hormigones convencionales. También se ha estudiado que a medida que disminuye la calidad del agregado reciclado, es mayor el incremento de la permeabilidad al ion cloruro en hormigones reciclados respecto al hormigón convencional [83].

2.4 MEJORAS EN LA CALIDAD DEL HORMIGÓN RECICLADO

La diferencia más distintiva entre las propiedades de los agregados reciclados de hormigón y los agregados gruesos naturales es la capacidad de absorción de agua, siendo más elevada en el primer caso, debido a la presencia del mortero adherido, el cual presenta mayor porosidad

que el agregado natural. Si bien, la mayor rugosidad que otorga la presencia de dicho mortero, frente a otros agregados naturales, como es el caso del canto rodado, permite obtener mejoras en el comportamiento mecánico del nuevo hormigón [70], este mortero también presenta microporos y fisuras que afectan la interfase entre el agregado reciclado y la nueva pasta de cemento, en la elaboración de un nuevo hormigón [73].

El desarrollo de técnicas que pueden reducir al mínimo este efecto adverso, es muy importante, pues su objetivo es consolidar la capa de mortero de adherencia y reducir la porosidad de agregado reciclado, mejorando así la interfase entre el agregado reciclado y la nueva pasta de cemento en el hormigón nuevo.

Con esta premisa, Shayan y Xu [84] realizaron un estudio en el cual se propone el uso de la cal y el humo de sílice para mejorar las propiedades superficiales del agregado reciclado y los resultados demostraron que con estas mejoras, el agregado reciclado se puede utilizar para producir hormigones estructurales de hasta 50 MPa con propiedades de durabilidad similares a las de agregados naturales. Tsujino et al. [85] investigaron sobre el uso de dos tipos de agentes de tratamiento superficial, para mejorar las propiedades de los agregados reciclados.

Por su parte, V.W. Tam et al. [86], propusieron un nuevo método de elaboración del hormigón reciclado, realizando la mezcla en dos etapas, “two-stage mixing approach (TSMA)”, como se puede apreciar en las Figuras 2.4, con el propósito de mejorar la resistencia a la compresión y lograr una menor variabilidad en su comportamiento mecánico. Los resultados de esta investigación, en la que se realizaron reemplazos de agregado grueso natural por agregado reciclado, de hasta un 30 %, mostraron mejoras en la resistencia a compresión, siendo éstas, más importantes cuanto mayor era el porcentaje de sustitución del agregado natural, por hormigón triturado. Este efecto, se atribuye a la naturaleza porosa de los áridos reciclados y, por lo tanto, en el proceso de premezcla se pueden llenar algunos poros y fisuras, dando lugar a un hormigón más denso, mejorando la zona de interfaz del árido reciclado y, por tanto, dando una mayor resistencia a compresión que con la forma tradicional de mezclado.

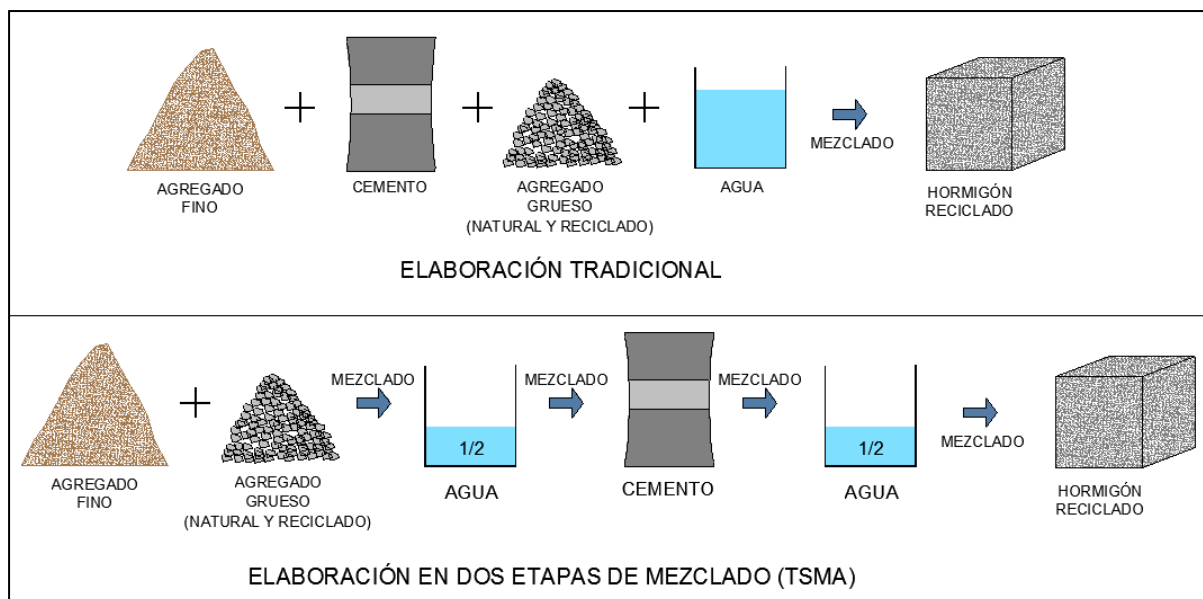


Figura 2.4: Procedimientos de mezclas: en forma tradicional y en dos etapas (TSMA) [86]

En el estudio mencionado en el párrafo anterior, con la adopción de dos etapas de mezcla se logra reforzar el eslabón débil del hormigón reciclado, el cual se encuentra en la zona interfacial del agregado reciclado. Este método permite que la pasta de cemento forme una capa superficial sobre el agregado reciclado, llenando los poros y fisuras presentes en el mismo.

En otra investigación, V. W.Y. Tam y C.M. Tam [87], plantearon otras alternativas para la elaboración del hormigón en dos etapas (TSMA), a la que llamaron TSMA_s y TSMA_{sc}. Las mismas se desarrollaron mediante la adición, en la etapa de premezcla, de sílica fume. Los resultados de la misma mostraron un aumento de la densidad del mortero adherido en el agregado reciclado, debido a que dichas adiciones llenaron los poros y fisuras presentes en el mismo, permitiendo además mejorar el comportamiento de la zona interfacial entre el agregado reciclado y la nueva pasta de cemento (Figura 2.5), y logrando mejoras en las características mecánicas del hormigón reciclado, con superiores resultados que en el caso de no utilizar sílica fume, en la etapa de premezcla (TSMA).

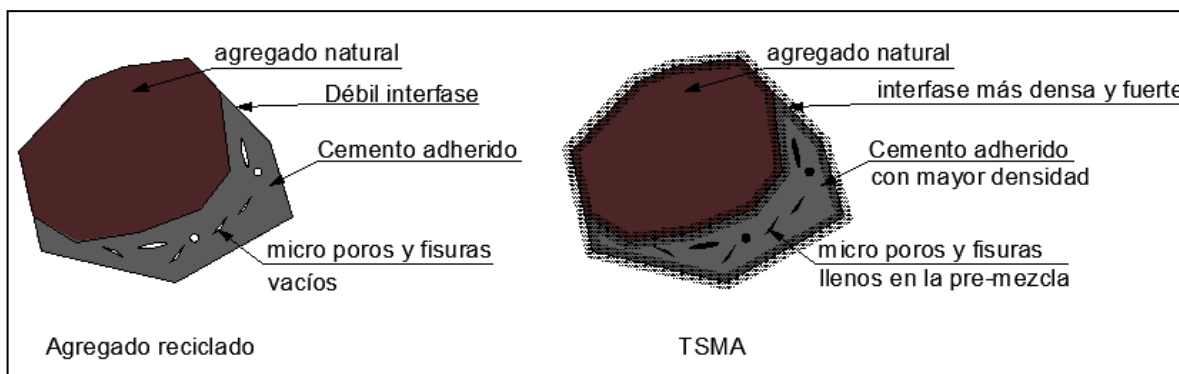


Figura 2.5: Estructura del agregado reciclado antes y después de adoptar la mezcla en dos etapas TSMA [87]

Por otro lado, Shi-Cong Kou y Chi-Sun Poon [73], realizaron un estudio experimental para mejorar las propiedades de los agregados reciclados de hormigón mediante su impregnación con alcohol polivinílico (PVA), obteniendo mejoras en el comportamiento mecánico del hormigón reciclado.

2.5 CONCLUSIONES

Del análisis de la bibliografía analizada, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Los agregados reciclados presentan diversas cantidades de mortero adherido. Esta particularidad es la causa principal de la variación en sus propiedades respecto a los agregados naturales.

La densidad del agregado reciclado presenta valores ligeramente inferiores, respecto a la de los agregados naturales.

Los agregados reciclados poseen una textura, por lo general, más rugosa que la de los agregados naturales y presentan mayor porosidad.

La absorción capilar es una de las características más desfavorables que presenta el agregado reciclado, en relación con el agregado natural y es quizás el principal inconveniente que presenta, para su utilización en la fabricación de hormigón.

Los agregados reciclados poseen una resistencia al desgaste inferior a la de los agregados naturales.

La resistencia a la helada de los agregados reciclados suele ser inferior a la de los agregados naturales, debido a su mayor porosidad.



El contenido de cloruros de los agregados reciclados es elevado, cuando proceden de hormigones empleados en obras marítimas o de construcciones en contacto con sales que los contengan.

El agregado reciclado puede presentar un alto contenido en sulfatos acumulados en el mortero adherido y en la presencia de impurezas, como el yeso cuando los RCDs proceden de edificación.

Por lo general, los agregados reciclados presentan mayor cantidad de contaminantes e impurezas que los agregados naturales, afectando negativamente a las propiedades del hormigón.

Saturando los agregados reciclados antes del amasado, se evitará el aumento de la consistencia derivado de una mayor absorción que presenta el agregado reciclado.

La densidad del hormigón reciclado en estado fresco o endurecido es inferior a la del hormigón convencional. La cantidad de aire ocluido en su masa es similar.

La resistencia a compresión del hormigón reciclado disminuye, en general, respecto al convencional, aunque en algunas ocasiones se observan incrementos en dicho valor. El porcentaje de agregado natural sustituido, la calidad del hormigón original y la cantidad de mortero adherido son los factores que más inciden en el valor de la resistencia.

El módulo de elasticidad, la retracción y la fluencia en los hormigones reciclados son las propiedades más afectadas cuando se sustituye la totalidad del agregado grueso, tomando valores sensiblemente inferiores a los del hormigón convencional.

Al presentar el hormigón reciclado mayor porosidad, absorción capilar y permeabilidad que el convencional, el proceso de carbonatación se propagará más rápidamente. En ambientes propicios podrán producirse más fácilmente el ataque por sulfatos o la penetración de cloruros. La reacción alcali-agregado tendrá que evaluarse aunque ni los agregados ni el hormigón original del que procedan fueran inicialmente reactivos.

Afortunadamente, en el mundo se están realizando numerosas investigaciones que pretenden mejorar las falencias que presentan los agregados gruesos reciclados, debido a que el reciclado de hormigones demolidos es una buena alternativa para la conservación del ambiente, la reducción de costos y en muchos casos, el aprovechamiento de los espacios que antes eran ocupados por residuos de la construcción y demolición.

2.6 REFERENCIAS

- [1] Servas V., “Recycling concrete materials.”, *Civil Engineering*, 9, 1981, 45–53.
- [2] Cheung H.K., “Use of recycled asphalt pavement—a practical approach to asphalt recycling.”, *Materials Science and Technology in Engineering Conference, Now, New and Next*, 2003, 15–17.
- [3] Hassan K.E., Brooks J.J., Erdman M., “The use of reclaimed asphalt pavement aggregates in concrete, waste materials in construction.”, *WASCON 2000, Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection*, Harrogate, England, 2000, 121–128.
- [4] Poon C.S., Azhar S., Kou S.C., “Recycled aggregates for concrete applications.”, *Materials Science and Technology in Engineering Conference, Now, New and Next*, 2003.
- [5] Yoda K., Yoshikane T., Nakashima Y., Soshiroda T., “Recycled cement and recycled concrete in Japan, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Reuse of Demolition Waste.”, Chapman and Hall, London, 1988, 527– 536.
- [6] Etxeberria M., Vázquez E., Mari, A., Barra M., “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.”, *Cement and Concrete Research*, 37, 2007, 735–742.
- [7] Topcu I.B., “Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete.”, *Cement and Concrete Research*, 27, 12, 1997, 1817-1823.
- [8] Olorunsogo F.T., Padayachee N., “Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes.”, *Cement and concrete Research*, 32, 2002, 179–185.
- [9] Levy S.M., Helene P., “Durability of recycled aggregates concrete.”, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004, 1975–1980.
- [10] Di Maio A.A., Zega C., Taus V., Traversa L.P., “Durability of Recicled concretes.”, *INCERC. Comportarea in Situ a Constructiilor. Conferinta Natianala. Bucares, 2004.*
- [11] Nixon P.J., “Recycled concrete as an aggregate for concrete.”, *RILEM Committee, 37/DRC. Demolition and reuse of concrete. Materiaux et Constructions*, 11, 65, 371-378.
- [12] Yagishita F., Sano M., Yamada M., “Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate.”, *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium. Edited by Erik K. Lauitzen, 1993, 331-342.*
- [13] Hansen T.C., Boeogh E., “Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete.”, *ACI Journal*, 82, 5, 1985, 648-652.
- [14] Ravindrarajah R.S., Loo Y.H., Tam C.T., “Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregate in Concrete.”, *Magazine of Concrete Research*, 39, 141, 1987, 214-220.
- [15] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). “Recicled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete.”, *Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1992.*
- [16] Casaccio M., Torrijos M.C., Giaccio G., et al., “Failure mechanism of recycled aggregate concrete.”, *Construction and Building Materials*, 22, 2008, 1500-1506.
- [17] Dhir R. K., Limbachiya M. C., Leelawat T., “Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes.”, *Structures and Buildings*, 1999.
- [18] Hansen T.C., Nerud H., “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate.”, *Concrete International*, 5, 1, 1993, 79-83.
- [19] Limbachiya M.C., Leelawat T., Dhir R.K., “Use of Recycled Concrete Aggregate in High-Strength Concrete.”, *Materials and Structures*, 33, 233, 2000, 574-580.

- [20] Sánchez de Juan M., Alaejos Gutiérrez P., “ Study on influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.”, *Construction and Building Materials*, 23, 2, 2009, 872-877.
- [21] Barra M., “Estudio de la Durabilidad de Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural.”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. 1996.
- [22] Hansen T.C., Torben C., “Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete, Second State Of The Art Report, Developments 1945-1985.”, *Materials and Structures*, 1996.
- [23] Katz A., “Properties of Concrete made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete.”, *Cement and Concrete Research*, 33, 5, 2003, 703-711.
- [24] Tanaka K., Yada K., Maruyama I., Sato R., Kawai K., “Study on corrosion of reinforcing bar in recycled concrete.”, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, España. Ed. E. Vázquez, Ch.F. Hendriks y G.M.T. Janssen, RILEM, pp. 643-650, 2004.
- [25] Gómez J.M., Agulló L., Vázquez E., “Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto”. *Construcción y Tecnología*, 13, 157, 2001, 10-20.
- [26] Hernández C., Fornasier G., “Caracterización de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado.”, *Memorias Simposio Internacional fib “El Hormigón Estructu-ral y el Transcurso del Tiempo”*, La Plata, Argentina., Ed. A. Di Maio y C. Zega, 2, 833-840.
- [27] Poole A., Sims I., “Geology, aggregates and classification. In: *Advanced Concrete Technology-Constituent Materials.*”, Ed. John Newman y Ban Seng-Choo, El-sevier Ltd., 2003
- [28] Czarnecka E.T., Gillott J.E., “Effect of different types of crushers on shape and roughness of aggregates.”, *Cement, Concrete and Aggregates*, ASTM, 4, 1, 1982, 33-38.
- [29] Malek B., Iqbal M., Ibrahim A., “Use of selected waste materials in concrete mixes.”, *Waste Management*, 27, 2006, 1870-1876.
- [30] European Demolition Association (EDA). “Demolition and Construction Debris: Questionnaire about an EC Priority Waste Stream.”, The Hague, 1992.
- [31] Ravindrarajah R.S., Tam C.T., “ Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate.”, *Magazine of Concrete Research*, 37, 130, 1985, 29-38.
- [32] Khatib J.M., “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.”, *Cement and Concrete Research*, 35, 4, 2005, 763-769.
- [33] Buttler A.M., “Concreto con agregados graúdos reciclados de concrete fluência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.”, Tesis de Magíster, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, 199.
- [34] Ikeda T., Yamane S., Sakamoto A., “Strengths of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate.”, *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Sympolium on Emolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Japan, 2, 1988, 585-594.
- [35] Sánchez de Juan M., “Estudio sobre la Utilización de Áridos Reciclados para la Fabricación de Hormigón Estructural.”, Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [36] Zega C.J., Taus V.L., Villagrán Z. Y.A., Di Maio A.A., “Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos.”, *Memorias Simposio In-ternacional fib “El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo”*, La Plata, Argentina. Ed. A. Di Maio y C. Zega, 2, 2005, 761-768.
- [37] Nagataki S., Gokce A., Saeki T., “Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete.”, *Proceedings of the Fifth Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Barcelona, 2000, 51-71.
- [38] Ravindrarajah R.S., Loo Y.H., Tam C.T., “Strength evaluation of recycled aggregate concrete by in-situ tests.”, *Materials and Structures*, 21, 124, 1988, 289-295.

- [39] Machado E.F., Latterza L.M., “Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de residuos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação.”, Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur, Santa Fé, Argentina, 1997, 207-218.
- [40] Kasai Y., Hisaka M., Yanagi K., “Durability of concrete using recycled coarse aggregate.”, Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonary, Tokyo, 2, 1988, 623–632.
- [41] Padmini A.K., Ramamurthy, K., Mathews M.S., “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete.”, Construction and Building Materials, 23, 2, 2009, 829-836.
- [42] Ruhl M., “Water Absorption Capacity of Recycled Demolition Rubbish.”, Darmstadt Concrete, Ausgabe, 97, 12, 1992.
- [43] Tavakoli M., Soroushain P., “Strengths of recycled aggregate concrete made using field – demolished concrete as aggregate.”, ACI Materials Journal, 93, 2, 1996, 182-190.
- [44] Dhir R.K., Limbachiya M.C., Leelawat T., “Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes.”, Structures and Buildings, 1999.
- [45] Zaharieva R., Buyle Bodin F., Skoczlas F., Wirquin E., “Assessment of the Surface Permeation Properties of Recycled Aggregate Concrete.”, Cement and Concrete Composites, 2001.
- [46] Buyle-Bodin F., Hadjieva-Zaharieva, R., “Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete.”, Materials and Structures, 35, 252, 2009, 504-509.
- [47] Tabsh S.W., Abdelfatah A.S., “Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete.”, Construction and Building Materials, 23, 2, 2009, 1163-1167.
- [48] CIRSOC 201:2005, “Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.”, Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- [49] Zega C.J., “Hormigones reciclados: caracterización de los agregados gruesos reciclados.”, Tesis de Magíster, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2008, 135.
- [50] Di Niro G., Dolara E., Ridgway P., “Recycled Aggregate Concrete (RAC): Properties of Aggregate and RC Beams Made from RAC.”, Concrete for Environment Enhancement and Protection, Concrete in the Service of Mankind, Proceedings of the International Conference Held University of Dundee, Scotland, UK, 1, 1996, 141-149.
- [51] Dosho Y., Kikuchi M., Narikawa A., Oshima A.K., “Application of Recycled Concrete for Structural Concrete – Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate.”, Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, 2000.
- [52] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures), “Specifications for concrete with recycled aggregates.”, Materials and Structures, 27, 1994, 557-559.
- [53] Collins R.J., “BRE Digest 433: Recycled Aggregates.”, 1998.
- [54] Kwan A.K.H., Wang Z.M., Chan H.C., “Mesoscopic study of concrete: II. Nonlinear finite element analysis.”, Computers and Structures, 70, 5, 1999, 545– 556.
- [55] Tasdemir M.A., Tasdemir C., Akyuz S., Jefferson A.D., Lydon F.D., Barr B.I.G., “Evaluation of strains at peak stresses in concrete: a threephase composite model approach.”, Cement and Concrete Composites, 20, 4, 1998, 301– 318.
- [56] Wang Z.M., Kwan A.K.H., Chan H.C., “Mesoscopic study of concrete: I. Generation of random aggregate structure and finite element mesh.”, Computers and Structures, 70, 5, 1999, 533-544.
- [57] Bentz D.P., Garboczi E.J., “Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone.”, ACI Materials Journal, 4, 1991, 518– 529.

- [58] Mindess S., Young J.F., Darwin D., "Concrete, Upper Saddle River, Prentice Hall, New Jersey.", 2003.
- [59] Mehta P.K., Aitcin P.C., "Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete.", High Strength Concrete Second International Symposium, ACI SP-121, 1990, 265– 279.
- [60] Nealen A., Ruhl M., "Consistency Aspects in the Production of Concrete Using Aggregates from Recycled Demolition Material.", 1997.
- [61] Kaga H., Kasai Y., Takeda K., Kemi T., "Properties of Recycled from Concrete.", Demolition and Reuse of Concrete an Masonry, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Japan, 2, 1988, 690-698.
- [62] Marmash B.E., "The Properties of Recycled Precast Concrete Hollow Core Slabs for Use as Replacement Aggregate in Concrete.", Waste Materials in Construction, 2000, 769-781.
- [63] Di Maio A., Giaccio G., Zerbino R., "Hormigones con agregados reciclados.", Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, 9, 2002, 5-10.
- [64] Hansen T.C., Boeegh E., "Strenght of Recycled Concrete Made from Coarse and Fine Recycled Concrete.", Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium, 2, 1988, 605-512.
- [65] Ravindra K., Dhir N.A., Henderson M.C., Limbachiya A., "Use of Recycled Concrete Aggregate." Reino Unido, 1998.
- [66] Vries P., "Concrete recycled: crushed concrete as aggregate.", 21st annual Convention of the Institute of Concrete Technology Coventry, April, 1993.
- [67] Turner-Fairbanks Highway research Center and Federal Highway administration, User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction, 2002.
- [68] Gonçalves A., Esteves A., Vieira M., "Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability.", International RILEM Conference "The use of recycled materials in building and structures", Barcelona, España. Ed. E. Vázquez, Ch.F. Hendriks y G.M.T. Janssen, RILEM, 554-562.
- [69] Señas L., Priano C., Valea J., Cabo G., "Reciclado de Hormigones de Canto Rodado Patagónico.", 16^o Reunión Técnica de la AATH, 2006.
- [70] Zega C.J., Taus V.L., Di Maio A.A., "Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado.", Boletín Técnico (IMME), Universidad Central de Venezuela, 44, 3, 17-26.
- [71] Nishbayashi S., Yamura K., "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing concrete.", Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, 2, 1988, 652-659.
- [72] González F.B., Martínez A.F., "Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties.", Materiales de Construcción, 55, 53-66, 2005.
- [73] Kou S.C., Poon C.S., "Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources.", Magazine of Concrete Research, 60, 99. 57-64, 2008.
- [74] Sánchez de Juan M., "Estudio sobre la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigón estructural.", Tesis doctoral, Univ.Politécnica de Madrid, 2005.
- [75] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). Recycled aggregates and recycled aggregate Concrete, Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1992.

- [76] Teranishi K., Kikuchi M., Dosho Y., Narikawa M., "Application of Recycled Aggregate Concrete for Structural Concrete. Part 3- Production of Recycled Aggregate by Real-Scale Plant and Quality of Recycled Aggregate Concrete.", *Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction*, Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya, 1998, 143-156.
- [77] Dillmann R., "Concrete with recycled concrete aggregate, Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate.", London, UK, 1998, 239-253.
- [78] Hosokawa Y., Maeda N., Hayasaka T., "Influence of the time of removing mortar from recycled coarse aggregate on the properties of concrete products using recycled coarse aggregate from waste concrete.", *Proceedings of CSCE/JSCE International Conference on Engineering Materials*, Ottawa, Canada, 1997, 775-788.
- [79] Forster S.W., Moore S.P., Simon M.J., "Behavior of recycled concrete as aggregate in concrete.", *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Nice, France, 1994, 17-31.
- [80] Kawamura M., Torii K., "Reuse of recycled concrete aggregate for pavement.", *Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Tokyo, 2, 1988, 726-735.
- [81] Yamato T., Emoto Y., Soeda M., Sakamoto Y., "Some properties of recycled aggregate concrete.", *Proceedings of the Second International Symposium (RILEM) on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Tokyo, 2, 1988, 643-651.
- [82] Villagran Zaccardi Y.A., Zega C. J., Di Maio, A.A., "Chloride penetration and binding in recycled concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, 2008, 449-455.
- [83] Fukute T., Hamada H., Yamaj T., Ito M., Hayakama K., "A study on the applicability of recycled aggregate concrete under marine environments.", *International Seminar on Recycled Concrete*, 2000, 115-129.
- [84] Shayan A., Xu A., "Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate.", *ACI Mater J*, 100, 5, 2003, 371-80.
- [85] Tsujino M., Noguchi T., Tamura M., Kanematsu M., Maruyama I., "Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment.", *J Adv Concr Technol*, 5, 1, 2007, 13-25.
- [86] Tam V.W., Gao X.F., Tam C.M., "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.", *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, 1195-1203.
- [87] Tam V.W., Tam C.M., "Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA^{sc}.", *Construction and Building Materials*, 22, 2008, 2068-2077.
- [88] Kashino N., Takahashi Y., "Experimental studies on placement of recycled aggregate concrete.", *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, Ed. Y. Kasai, 2, 1988, 699-708.
- [89] Vázquez E., Barra M., "Hormigón de áridos reciclados; Retracción.", *V Seminario Desnvolvimiento Susatentavel e a Reciclagem na Construcao Civil*, Comité Técnico 206 Medio Ambiente, 2002, 7-14, 16-17.
- [90] Rasheeduzzafar Khan A., "Recycled Concrete-A Source for New Aggregate.", *Cement Concrete and Aggregates*, 6, 11, 1984.
- [91] Park S. G., "Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete.", *Study report*, 86, 1999.
- [92] Yamato T., Emoto Y., Soeda M., "Mechanical properties, drying shrinkage and resistance to freezing and thawing of concrete using recycled aggregate.", *Proceedings of the fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, 2000, 105-121.



- [93] González Fonteboa B., “Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante.”, Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña, 2002.
- [94] Mukai T., Kikuchi M., “Properties of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate.”, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium, Ed. Y Kasai, 2, 1988, 670-679.
- [95] Kikuchi M., Yasunaga A., Ehara K., “The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete.”, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Ed. Lauritzen E. K., 1993, 367-378.
- [96] Yanagi K., Hisaka M., Kalai Y., “Physical properties of recycled concrete using recycled coarse aggregate made of concrete with finishing materials.”, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Ed. Lauritzen, E.K., 1994, 379-390.
- [97] Hansen T.C., “Recycling of demolished concrete and masonry.”, RILEM Report of Technical Committee 37-DRC - Demolition and Recycling of Concrete, E & FN Spon, London, UK, 1992.
- [98] American Society for Testing and Materials; ASTM C 88-05, “Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.”, 2005.

CAPÍTULO 3

PROCESO DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DEL HORMIGÓN



CAPÍTULO 3

PROCESO DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DEL HORMIGÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

La corrosión del metal embebido en el hormigón es una de las principales causas del deterioro de las estructuras elaboradas con este material. La finalidad de quien proyecta y construye estructuras, es darle una protección a las barras de acero, con un adecuado recubrimiento de hormigón de baja permeabilidad, de forma tal que, los problemas de corrosión, no se desarrollen durante la vida útil de la estructura. Desgraciadamente, en la práctica esto no siempre se verifica, y es común que estructuras de hormigón sufran daños debidos a la corrosión del acero.

Los daños que genera el proceso de corrosión en las estructuras de hormigón armado son, la formación de fisuras, grietas, descascaramiento y, eventualmente, desprendimiento del recubrimiento. Además, un elemento de este material, puede sufrir daño estructural debido a la pérdida de adherencia entre el hormigón y el acero, y a la pérdida de sección de las barras. Dependiendo del tipo de elemento dañado (hormigón armado o pretensado), y del lugar en que se produce la afectación, puede ser determinante, uno u otro de estos mecanismos de deterioro, para llegar al colapso estructural.

3.2 MECANISMOS DESARROLLADOS EN EL DETERIORO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN, POR CORROSIÓN DE SUS ARMADURAS

La mayoría de los metales, no se encuentran en la naturaleza en forma metálica pura, sino que se hallan en forma de compuestos (óxidos, hidróxidos, sulfatos, etc.). La extracción de esos metales en forma elemental, requiere de adición de cierta cantidad de energía. Cuando ese metal se transforma en un producto de corrosión, ocurre la liberación de esa energía, llamada Energía Libre de Gibbs. La misma está asociada al potencial de la celda de corrosión (E_{celda}), a la cantidad del material involucrado en la reacción (N), y a la Constante de Faraday (F) [1].

Así, muchas veces el producto de corrosión de un metal, es semejante al mineral del que fue extraído. De esta manera, se tiene que:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E_{\text{celda}} \quad (3.1)$$

donde:

ΔG : Energía Libre de Gibbs

n : Número de moles

F : Constante de Faraday

E_{celda} : Energía de celda (diferencia entre el potencial de reducción y el de oxidación):

$$E_{\text{celda}} = E_{H^+/H_2} - E_{Fe/Fe^{2+}}$$

Desde este punto de vista, la corrosión puede ser entendida como la inversa del proceso metalúrgico. Mediante este proceso, el mineral se convierte en metal, y en el caso de existir corrosión, el metal retorna a su estado natural (Figura 3.1).

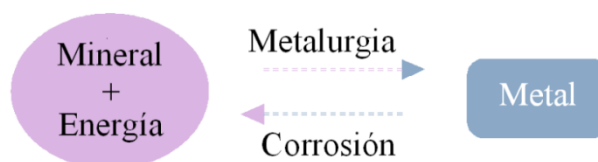


Figura 3.1: Esquema general del proceso de corrosión

La corrosión metálica, en un medio acuoso, es un fenómeno de carácter electroquímico, en el que se establece una diferencia de potencial entre dos metales, o entre diferentes partes del mismo metal.

En el hormigón armado, los potenciales electroquímicos necesarios para formar las celdas de corrosión, pueden ser generados de dos formas:

- **Celdas compuestas:** cuando dos metales distintos, son embebidos en el hormigón (por ejemplo: barras de acero y conductos de aluminio), o cuando existen significantes variaciones en las características de la superficie del acero.
- **Celdas de concentración:** pueden formarse debido a diferencias en la concentración de iones en la vecindad del acero (tales como álcalis, cloruros y oxígeno).

En este proceso electroquímico, ocurre una reacción de oxidación, otra de reducción, y una circulación de iones a través del electrolito (solución acuosa contenida en los poros del hormigón) y de electrones por el metal. O sea, alguna parte del metal (o uno de los dos metales, según sea el caso), se vuelve anódico, y el resto se convierte en catódico (Figura 3.2).

En la zona anódica, ocurre la oxidación del metal. Los electrones que son liberados, migran a través del metal, hasta la zona catódica (Figura 3.3). Allí, reaccionan con alguna sustancia presente en el electrolito, de manera de producir una reacción de reducción.

En medios ácidos, las reacciones más comunes son la reducción de los iones H^+ , o también del O_2 . En medios alcalinos y neutros, lo más frecuente, es la reducción del O_2 disuelto en el agua, o también del agua (últimas dos expresiones de reacción catódica).

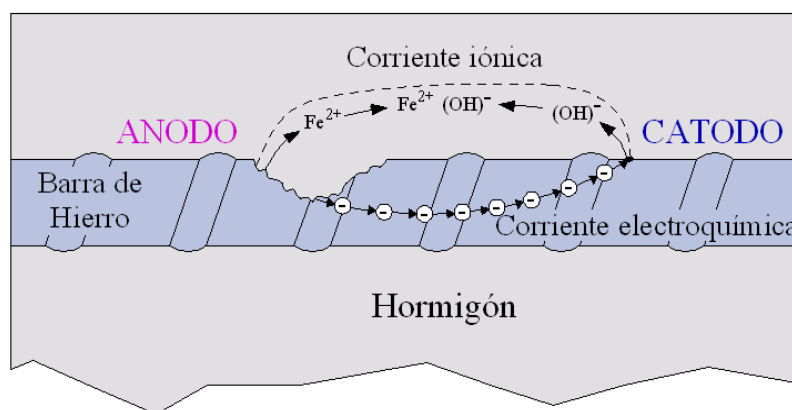
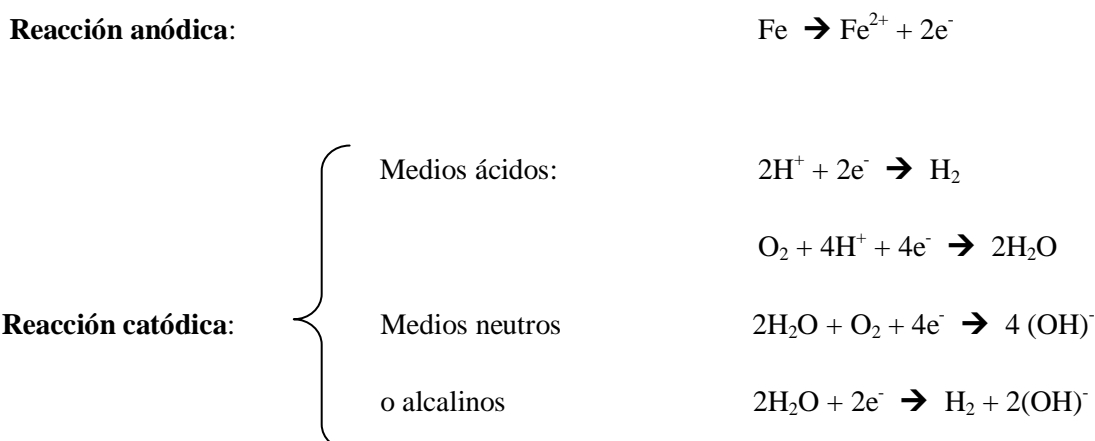


Figura 3.2: Celda simplificada de corrosión en hormigón armado [2]

En el proceso de corrosión de una armadura ubicada dentro del hormigón, se puede decir que ésta funciona como un electrodo mixto, donde ocurren reacciones anódicas y catódicas, en una solución contenida en la estructura de poros del hormigón (electrolito).

La transformación del hierro metálico en herrumbre, es acompañada por un incremento de volumen que, dependiendo del estado de oxidación (compuesto de hierro), puede superar el 600% del volumen de acero original (Figura 3.3).

Este incremento de volumen de los óxidos, es la causa principal de la expansión y fisuración del hormigón (Figura 3.4).

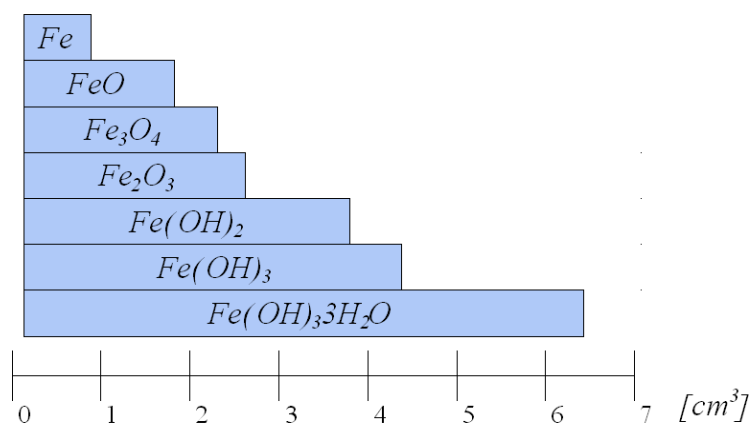


Figura 3.3: Volumen de los distintos compuestos formados durante la oxidación del hierro [3]

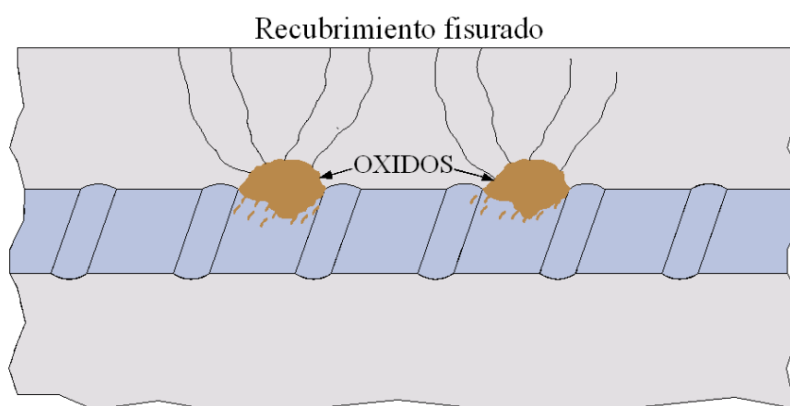


Figura 3.4: Fisuración del recubrimiento del hormigón, por la formación de productos de corrosión

Debe notarse, que la reacción anódica (generando ionización del hierro metálico) no progresará más, a menos que el flujo de electrones sea mantenido por el consumo de los

mismos en el cátodo. Por ello, es que la presencia tanto de aire, como de agua en la superficie del cátodo es absolutamente necesaria.

Además, el hierro es cubierto por una fina capa de óxido que se vuelve impermeable y está fuertemente adherida a su superficie, cuando las reacciones se producen en un medio alcalino. Así, lo hacen pasivo a la corrosión; es decir, el ion ferroso (Fe^{2+}) no se producirá, hasta que la pasividad sea destruida.

En ausencia de iones Cloruro (Cl^-) en la solución, el film protector del acero es estable, tanto como el pH de la solución permanezca sobre 11,5. Como los Cementos Portland hidratados contienen álcalis en la solución de poros y, aproximadamente, un 20 % (en peso) de hidróxido de calcio sólido, normalmente hay suficiente alcalinidad para mantener el pH del hormigón mayor que 12. En condiciones excepcionales (por ejemplo, cuando el hormigón tiene alta permeabilidad y los álcalis y la mayor parte del Hidróxido de Calcio están carbonatados, o neutralizados por una solución ácida), el pH del hormigón en la vecindad del acero puede ser reducido a menos de 11,5 y por ello, destruirse la pasividad del acero, generando el escenario para el proceso corrosivo.

Se sabe que el film protector puede ser destruido cuando el pH es considerablemente superior a 11,5, en presencia de iones Cl^- , dependiendo de la relación Cl^-/OH^- es superior a 0,6 probablemente porque el film de óxido de hierro se torna permeable o inestable bajo esas condiciones, el acero no tendrá protección contra la oxidación. Para las mezclas de hormigón usadas en la práctica, el umbral de contenido de Cl^- para iniciar la corrosión, puede estar en el rango de 0,6 a 0,9 kg de Cl^- por m^3 de hormigón [4,5].

Por otra parte, cuando hay presentes grandes cantidades de Cl^- , el hormigón tiende a tomar más humectación, lo que incrementa el riesgo de corrosión del acero, debido a que baja la Resistividad Eléctrica del hormigón. Una vez que la pasividad del acero es destruida, la Resistividad Eléctrica (para la conducción de iones) y la disponibilidad de oxígeno (para la reducción en el cátodo), controlan la velocidad de corrosión. En efecto, no se ha observado corrosión significativa en hormigones cuando la Resistividad Eléctrica supera los 50.000 a 70.000 $\Omega\cdot\text{m}$.



Las fuentes comunes que proveen Cl^- en el hormigón, son: aditivos en la mezcla, agregados contaminados con cloruro de sodio y penetración de soluciones salinas (como es el caso del agua de mar o los ambientes marinos).

3.3 CONTROL DE LA CORROSIÓN

El agua, el oxígeno y los iones Cl^- juegan importantes roles en la corrosión de las barras de acero y por lo tanto en la fisuración del hormigón, por ello, es obvio que la permeabilidad del hormigón es la llave de control de varios procesos involucrados en el fenómeno.

En tal sentido, con el fin de disminuir la permeabilidad, es importante el control de distintos parámetros en la mezcla, como por ejemplo: baja relación agua / cemento; contenido de cemento (kg/m^3 de hormigón); control de la graduación y tamaño de los agregados; uso de aditivos; una apropiada consolidación y curado del hormigón, etc.

También debe ser tenido en cuenta en el diseño de las mezclas, un probable incremento de la permeabilidad, durante la vida útil de la estructura debido a causas físico-químicas (ciclos congelamiento – deshielo, ataque de sulfatos, etc.).

Entre las medidas que colaboran a la protección contra la corrosión, importa la observancia de los contenidos máximos del Cl^- en la masa del hormigón, permitido por las diferentes Normas [6,7].

Ciertos parámetros de diseño también influyen sobre la posibilidad de ingreso de sustancias externas, como por ejemplo los espesores de los recubrimientos de las armaduras, y los anchos máximos de fisuras, debidas a tensiones originadas en cargas de servicio y/o fenómenos reológicos. Los Códigos de distintos países establecen valores: mínimos en el primer caso, dependiendo del ambiente a que estará expuesta la estructura, y máximos en el segundo caso [7].

Cabe mencionar que, como los costos por reparación y reemplazo de estructuras dañadas por corrosión de sus barras de acero, son muy importantes, en estructuras ubicadas en ambientes muy agresivos, muchos comitentes prefieren una inversión inicial extra, proveyendo membranas impermeables o finas coberturas, o agregando soluciones poliméricas (latex) al mortero de cemento Portland. Otras formas de prevenir corrosión, consiste en el uso de recubrimientos protectores de las barras, o también técnicas de protección catódica. Estos



sistemas obviamente, son más costosos que producir una baja permeabilidad del hormigón a través de un cuidadoso diseño y un control estricto de la calidad, durante la construcción.

3.4 FACTORES DESENCADENANTES DE LA CORROSIÓN. TIPOS DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

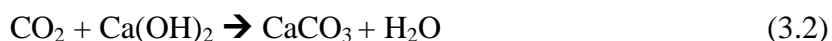
La despasivación de las armaduras, reconoce como principales causas la carbonatación y el ataque de cloruros; no obstante, también pueden presentarse actuando en conjunto.

3.4.1 CARBONATACIÓN

La carbonatación es un tipo particular de reacción ácida, de gran importancia en la durabilidad de las estructuras de hormigón.

Debido a los hidróxidos de calcio, de sodio y de potasio disueltos en la solución acuosa de la red de poros del hormigón, y en menor medida a los álcalis solubles de los agregados, se alcanza un pH de la disolución presente en los poros entre 12,5 y 13,5. Esta condición permite que el acero envuelto en el hormigón se encuentre en el punto P dentro del diagrama de Pourbaix (protegido de la corrosión).

El hormigón es un material muy poroso, el cual permite la penetración en su interior del CO₂ del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO₂ con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose carbonato cálcico. En términos simplificados, la reacción química para la fase acuosa se puede expresar mediante la siguiente Ecuación [7]:



Cuando todo el Ca(OH)₂, KOH y NaOH presentes en los poros ha sido carbonatado, el pH empieza a decrecer y deja de ser un elemento protector de la corrosión de las armaduras. Tan pronto como todo el cemento endurecido ha sido completamente carbonatado, se mide un pH menor de 9.

La Figura 3.5 muestra un modelo simplificado del proceso de carbonatación del hormigón:

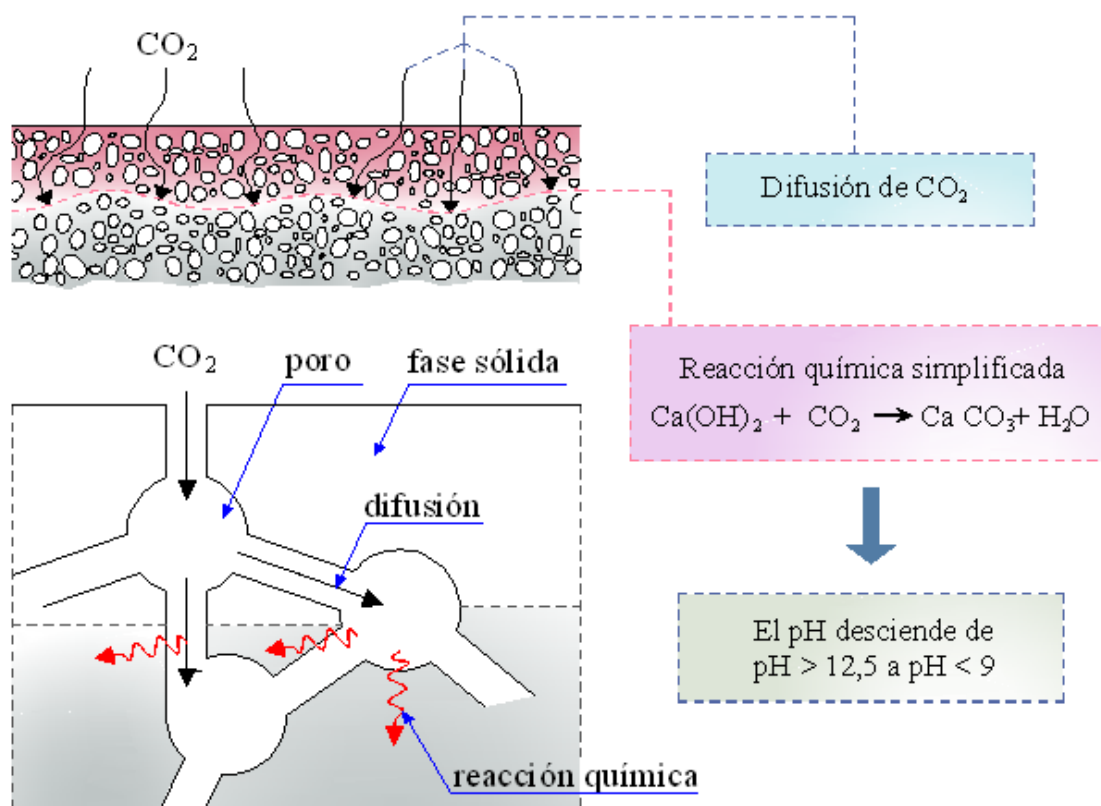


Figura 3.5: Esquema del proceso de carbonatación del hormigón (profundidad de carbonatación) [8]

El avance del frente de carbonatación se puede aproximar a la raíz cuadrada del tiempo.

$$X_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad (3.3)$$

donde:

X_c : profundidad de la capa carbonatada (mm)

K_c : Constante de carbonatación ($\text{mm/año}^{0.5}$)

t : tiempo (años)

Es importante señalar que el avance de la carbonatación se verá limitado por la humedad del ambiente, de manera que la ecuación anterior será válida para ambientes con humedad baja, ya que en escenarios donde se tenga humedad alta y valores próximos a la saturación no se produce corrosión, esta condición sugiere una profundidad límite para el frente de carbonatado.



El desarrollo de la carbonatación depende de diversos factores, entre los que se pueden enumerar los siguientes:

Contenido de CO₂ en la atmósfera:

La velocidad de carbonatación, naturalmente aumenta en ambientes con mayor concentración de CO₂. Ésta puede variar desde valores mínimos en medios rurales (0.03% en volumen), hasta valores muy elevados en las grandes ciudades (1% en volumen) [9,10].

Recubrimiento de las armaduras:

Resulta más que evidente la importancia de un adecuado recubrimiento de las armaduras, que las aisle del medio ambiente y sus agresividades. Es obvio que cuanto mayor sea el espesor de esta capa protectora de las armaduras, más tardará en penetrar la carbonatación y en llegar hasta la zona circundante al acero.

Como por razones resistentes se requiere el mayor brazo elástico posible, la armaduras en general se colocan lo más alejado posible del baricentro de la sección. Pero desde el punto de vista de la durabilidad, se requiere un recubrimiento determinado, que en ambientes agresivos, suele ser importante. Por ello, diversas normas dan valores mínimos aceptables, que dependen del tipo de estructura y del ambiente al que estará expuesta [6,7,11,12].

Cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento):

La cantidad de compuestos alcalinos disponibles dentro de la estructura de poros, para reaccionar con el CO₂, depende del tipo de cemento empleado en la producción del hormigón. Los cementos con adiciones presentan, en general, un desempeño inferior respecto a la resistencia a la carbonatación, con respecto a los Cemento Portland Puros [13].

Un aumento en la relación agua/cemento favorece el proceso de carbonatación al aumentar la permeabilidad de los hormigones; además, un aumento en la cantidad de cemento dificultaría el proceso.

Por otra parte, la profundidad de carbonatación, según [14], disminuye con la cantidad de cemento empleado por metro cúbico de hormigón.

Humedad relativa del ambiente:

La humedad relativa del ambiente, ejerce influencia sobre la cantidad de agua contenida en los poros del hormigón, afectando ésta, a su vez, a la difusión y a la reacción del CO_2 en el mismo. Cuando los poros están secos, el CO_2 difunde sin dificultades hacia el interior del hormigón, pero la reacción de carbonatación no ocurre, por falta de agua. Cuando los poros están llenos de agua, el frente de carbonatación es frenado debido a la baja difusión del CO_2 en agua. Por último, si los poros están parcialmente saturados de agua, la carbonatación avanza debido a la coexistencia de los dos factores: agua y posibilidad de difusión del CO_2 . Es conocido que el intervalo entre el 50 y el 75 % de Humedad Relativa, es el responsable de los mayores índices de carbonatación [15].

Condiciones de curado

Cuanto mayor es el tiempo de curado del hormigón, mayor será el grado de hidratación del cemento y menores serán la porosidad y la permeabilidad resultante. Como consecuencia, menor será la velocidad de avance del frente de carbonatación [16].

Fisuras

Naturalmente, un hormigón con fisuras, ofrece al CO_2 posibilidades de penetrar más rápidamente a su interior y carbonatar la pasta del hormigón. En el caso de fisuras de pequeños espesores, puede producirse el fenómeno de autosellado de las mismas, al avanzar el período corrosivo, debido a la colmatación de las mismas con alguno de los óxidos producidos por la corrosión del acero, minimizando la entrada de gases, por lo que no aumenta el riesgo de carbonatación [17].

3.4.2 CORROSIÓN POR IONES DE CLORURO

La bibliografía sobre durabilidad de las estructuras de hormigón [2,5,17,18,19,20], frecuentemente indica que la corrosión de la armadura debido a la acción de los cloruros, como uno de los más serios problemas que sufren las estructuras de hormigón. La presencia de una cantidad suficiente de Cl^- u otros iones despasivantes en contacto con la armadura, pueden provenir del medio externo: agua de mar, ambientes marinos, procesos industriales, terrenos salinos, sales de deshielo, etc., que se mueven por difusión, dentro de la red de poros. También pueden ser incorporados durante la etapa de amasado del hormigón: en el agua, en

los agregados o en los aditivos (por ejemplo: Cl_2Ca , como acelerante de fragüe). Cabe aclarar que la presencia de cloruros en los aditivos se haya fuertemente limitada como así también la utilización del cloruro de calcio como acelerador de fragüe. Argentina es uno de los primeros países que limita el uso de cloruro de calcio a partir del año 1964.

Los cloruros son transportados desde la superficie del hormigón hasta la armadura, a través del agua de la estructura de poros. Estos iones, son capaces de romper la capa pasiva que cubre al acero, y provocar una corrosión localizada, produciendo lo que se denomina “picadura”. Cuando los Cl^- están presentes en cantidades importantes, pueden causar la despasivación del acero, aún con valores de pH altos (hormigón sin carbonatar).

En la Figura 3.6 puede verse un esquema de los tipos de corrosión en armaduras, donde pueden apreciarse distintas morfologías de ataque (generalizada, como el caso de la acción de la carbonatación, o localizada como el ataque de cloruros o la corrosión bajo tensión).

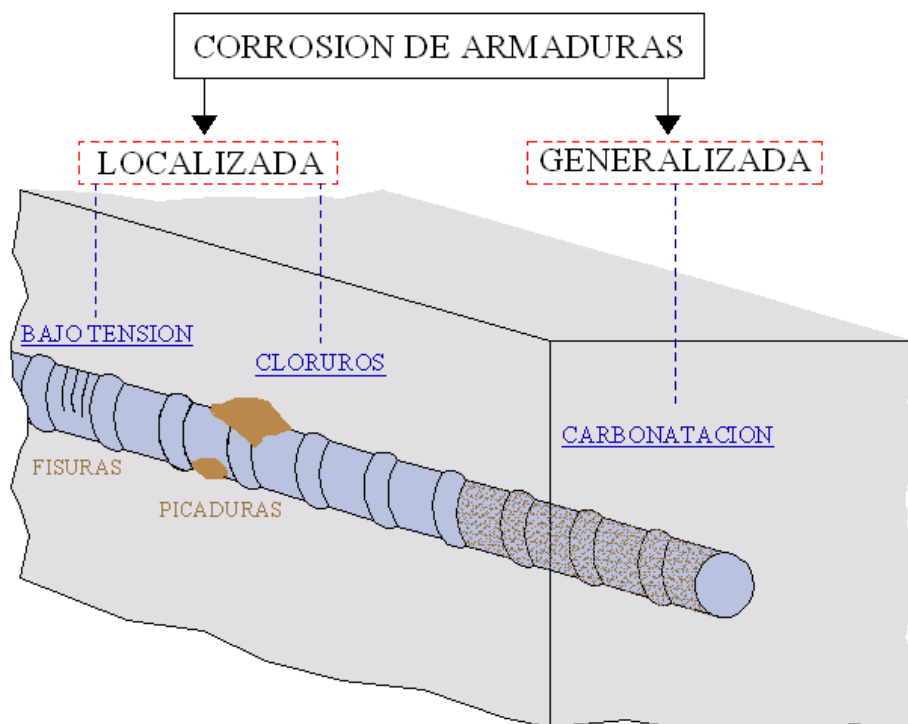


Figura 3.6: Tipos de corrosión de las armaduras [17]

Cuando la carbonatación se produce en un hormigón que contiene cloruros, se suman los efectos de ambos, potenciándose.



Los parámetros que influyen la penetración de los iones Cl^- , en el hormigón, son básicamente los mismos que influyen en la penetración de CO_2 , aunque no siempre de la misma forma.

Composición, tipo y cantidades de cemento

La cantidad de aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, determina la capacidad de combinación de los iones Cl^- ; por ello, cementos con baja cantidad de C_3A , poseen poca capacidad de inmovilizar los iones Cl^- , a través de la formación de una sal insoluble (cloro aluminato de calcio hidratado) [9,21,22].

Experiencias efectuadas por distintos investigadores, muestran que cuando se utilizan cementos con adiciones, sometidos a iones Cl^- , la despasivación puede verse frenada con el agregado de ciertas sustancias al cemento [23,24].

En cuanto a la cantidad de cemento, posee poca influencia sobre la despasivación [25]. Una mayor cantidad de cemento implica modificar la relación agua / cemento, entonces es éste factor el que influye.

Relación agua / cemento, compactación y curado

Estos parámetros, siendo bien controlados, contribuyen a la obtención de un hormigón más denso, y por lo tanto, sus influencias ante la penetración de iones Cl^- son similares a las mencionadas al considerar el avance de la carbonatación [26].

Grado de saturación de los poros y concentración de Cl^-

Las condiciones ambientales influyen a la penetración de iones Cl^- , de forma diferente que a la penetración de la carbonatación. En este último caso, la mejor condición para difundir y carbonatar las partes interiores del hormigón ya se vio que está dada por la existencia de poros saturados. El transporte de iones Cl^- dentro de la masa del hormigón, solamente ocurre en poros completamente saturados de agua.

En situaciones donde el agua con gran concentración de Cl^- , rodea la estructura, la penetración ocurre a través del mecanismo de capilaridad. Cuando la atmósfera contiene gran

cantidad de Cl^- , también pueden penetrar por difusión, si se tienen los poros del hormigón saturados. Asimismo, pueden penetrar por succión capilar, en los casos que la estructura esté sometida a ciclos de humedecimiento y secado, con el agua que contiene Cl^- . En la Figura 3.8, se muestra un esquema del fenómeno electroquímico de la Corrosión por Cl^- .

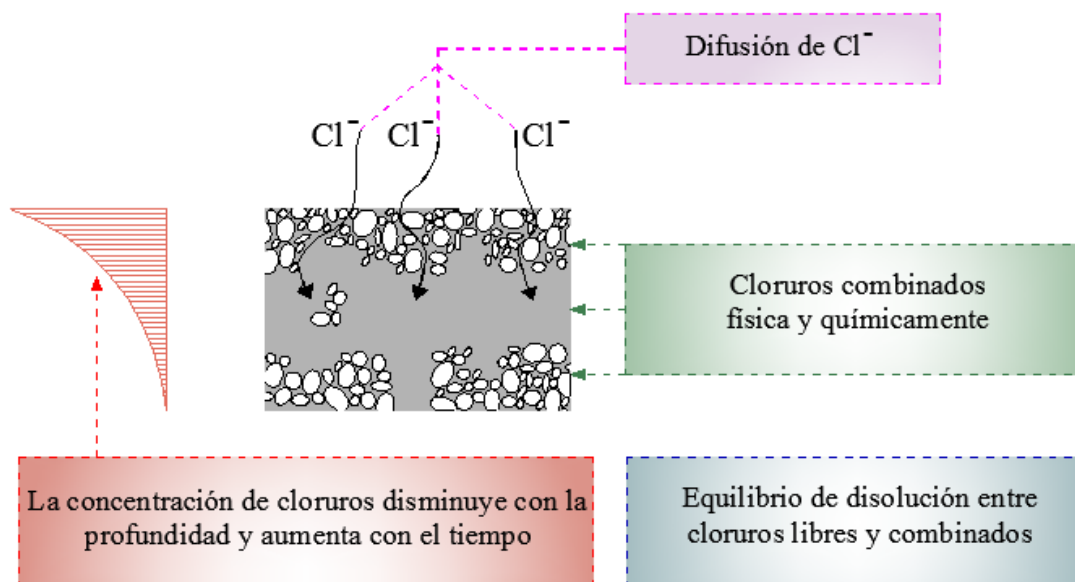


Figura 3.7: Esquema del fenómeno electroquímico de la Corrosión por Cl^- [2]

Fisuras

Igualmente al caso de carbonatación, una estructura fisurada expuesta a soluciones con cloruros, encontrará rápidas vías de acceso en las fisuras, creando pequeñas zonas anódicas en una región de las mismas, y grandes regiones catódicas en el resto [27,28]. Ello hará que avance la corrosión localizada rápidamente (según la relación área anódica / área catódica).

Carbonatación

Aun cuando el contenido de iones Cl^- libres en un hormigón sea inferior al necesario para despasivar la armadura, cuando el hormigón comienza a carbonatar, parte de los iones Cl^- combinados pasan a ser libres, pudiendo llegarse a superar el límite que origine la rotura de la capa pasiva. La interacción de la carbonatación y de los iones Cl^- , lleva a una aceleración de la velocidad de corrosión, comparada con la que tendría con los dos factores actuando en forma independiente [29,30].

3.5 OTROS FACTORES DESENCADENANTES DE CORROSIÓN

Corrientes Vagabundas

Las corrientes vagabundas son corrientes que circulan por el hormigón y se introducen en la armadura. Están originadas en tomas a tierra defectuosas, en proximidades de fuentes de corriente continua (por ejemplo: ferrocarriles eléctricos) o equipos de protección catódica por corriente impresa. La zona por donde penetra la corriente, de mayor potencial, es el cátodo, y la zona por donde sale, de menor potencial, es el ánodo y por lo tanto, las barras se corroen.

Celdas de aireación diferencial

Cualquier factor que lleve a la disminución localizada de la concentración de oxígeno, en determinada zona de la armadura, con relación a otra de la misma armadura, contribuye a la formación de pilas de aireación diferencial. Aquí, la reacción catódica tiende a producirse en áreas de mayor acceso de oxígeno, mientras que la anódica en las de menor concentración.

Celdas de aireación diferencial

Ocurre cuando existe contacto a través de un electrolito, de metales distintos, produciéndose una diferencia de potenciales entre los metales, que genera un proceso electrolítico y la consiguiente corrosión de ánodo (metal de menor potencial).

Puestas las barras de acero junto a elementos de aluminio o magnesio, por ejemplo, en un electrolito (hormigón), estos últimos metales (de menor potencial que el hierro) actuarán como ánodos, corroyéndose frente al hierro que hace de cátodo. Este es el principio usado para proteger de la corrosión a las barras, conocido como protección catódica. Pero por el contrario, elementos de cobre (de mayor potencial que el hierro), actuarán de cátodo frente a las barras de acero, que actúan como ánodo, corroyéndose estas últimas [31].

3.6 FACTORES QUE CONTROLAN LA CINÉTICA DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

Una vez iniciada la corrosión del acero, la velocidad de deterioro es importante, si la oferta de oxígeno y humedad es suficiente, El modelo más empleado para predecir la vida útil de las estructuras, es el presentado por Tutti [3], que se reproduce en la Figura 3.8.

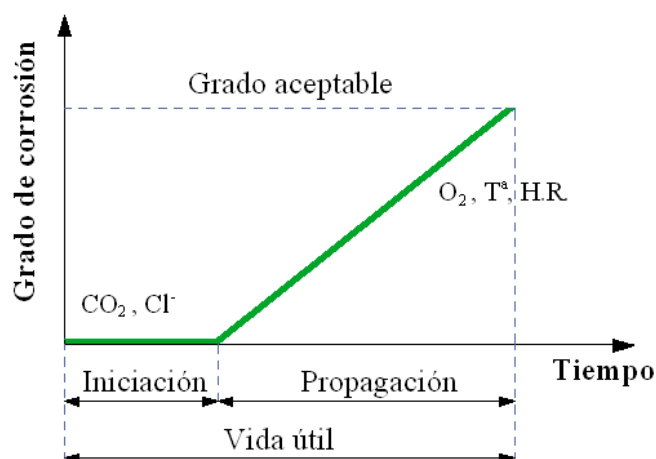


Figura 3.8: Vida útil de las estructuras de hormigón armado en función de la corrosión de su armadura [3]

En este modelo se distinguen dos períodos:

Iniciación: es el lapso de tiempo que tardan los cloruros y/o la carbonatación en llegar a la armadura, y despasararla.

Propagación: durante este tiempo, la armadura se corroe, hasta que llega a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad, y/o funcionalidad y/o estética.

Este proceso solamente puede producirse si existe oxígeno y humedad en cantidades adecuadas, y que la temperatura como en todo proceso químico acelera al mismo.

Conviene señalar que la velocidad de corrosión, básicamente, puede ser controlada por los procesos anódicos y catódicos, anteriormente citados.

Cuando un metal se introduce en una solución acuosa, se llega a un estado estacionario. Este estado se cuantifica, comparando la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo de referencia (fabricado con materiales cuyo comportamiento es virtualmente independiente del medio). Los típicos electrodos de referencia usados en estructuras de hormigón son: Cu-SO₄CU (CSE), Hg-Hg₂Cl₂ calomel saturado /SCE) y Ag-AgCl, expuestos al mismo medio. Esta diferencia de potencial se la denomina “Potencial de Corrosión” o “Potenciales Electroquímicos de Corrosión”.

Es importante destacar que el valor del Potencial de Corrosión, depende de las actividades del cátodo y el ánodo. La electroquímica de estos procesos puede describirse en términos de

curvas de Potencial versus el logaritmo de la Densidad de Corriente. La Densidad de Corriente es proporcional a la velocidad de las reacciones catódicas o anódicas. Estas curvas se denominan curvas de polarización: anódica (A) y catódica (C), representados en la Figura 3.9.

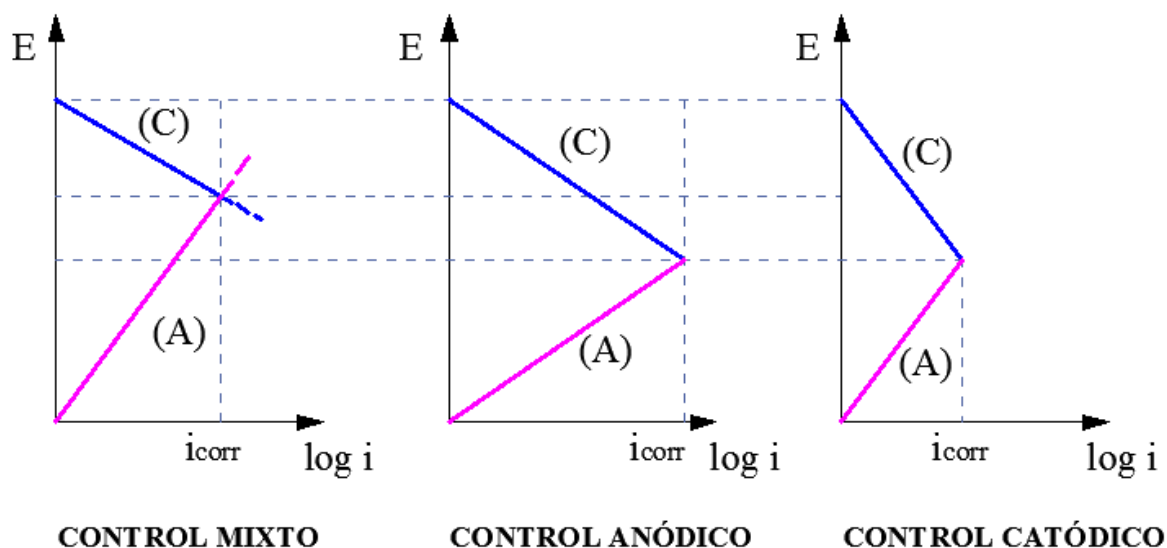


Figura 3.9: Diagrama de Evans (Influencia del control mixto, catódico y anódico en la velocidad de corrosión). (A): curva de polarización anódica; (C): curva de polarización catódica

Como en todo proceso químico, las reacciones anódicas y catódicas deben estar balanceadas. Hay un flujo de electrones desde las zonas anódicas hacia las zonas catódicas, y existe un contraflujo de iones dentro de la solución, desde las zonas catódicas, hacia las zonas anódicas (Figura 13). Si las áreas anódicas y catódicas son iguales, el potencial de corrosión (E_{corr}) es el potencial en el cual las velocidades catódicas y anódicas están balanceadas y son iguales (en valor absoluto), constituyendo la llamada corriente de corrosión (i_{corr}).

En los tres Diagramas de Evans presentados en la Figura 3.10, puede verse que debido a una modificación en la curva anódica, el potencial E_{corr} disminuye, aumentando la velocidad de corrosión (i_{corr}). Las reacciones anódicas gobiernan la velocidad en el denominado control anódico. Si por el contrario la que varía es la curva catódica, el potencial E_{corr} puede ser igual al anterior, pero la velocidad de corrosión disminuye, constituyéndose en un caso de control catódico.

Esto habilita a observar, que un cambio de E_{corr} no es suficiente para determinar si la velocidad de corrosión aumenta o disminuye. Por ello, debe enfatizarse en la necesidad de

determinar las condiciones del medio, cuando se sacan conclusiones respecto de las velocidades de corrosión (i_{corr}), basadas solamente en el potencial de corrosión (E_{corr}).

Los factores que influyen en la cinética de la propagación del proceso de corrosión de las armaduras son [9,17]:

Contenido de humedad:

El contenido de humedad en el interior del hormigón, es el factor que ejerce la mayor influencia sobre la corrosión. Esto se debe a que el agua es necesaria para disolver el oxígeno que interviene en la reacción catódica de reducción y además, influye en la Resistividad del hormigón (transporte de iones)

Si los poros del hormigón están saturados de humedad (por ejemplo, en estructuras sumergidas en agua), el acceso a la superficie de la barra está dificultado, por lo que la velocidad de corrosión es moderada o baja, a pesar de poseer una alta Conductividad de iones, que provee la baja Resistividad del hormigón.

Si los poros contienen muy poca humedad (hormigón seco), la Resistividad del hormigón es elevada, por lo cual la velocidad de corrosión será también baja, aunque el hormigón esté carbonatado y/o contaminado con Cl^- .

Los hormigones con alto contenido de humedad, pero con poros sin saturar, proveen las condiciones para que se desarrolle la máxima velocidad de corrosión en las armaduras: baja Resistividad y fácil acceso del oxígeno a la superficie metálica.

Temperatura

La temperatura puede influir en dos sentidos:

- a) El ascenso de temperatura, promueve un aumento de la movilidad de los iones, por lo que producirá un incremento de la velocidad de corrosión.
- b) Las variaciones de temperatura, pueden afectar los contenidos de humedad dentro de la masa del hormigón, por lo que se modificará su Resistividad, y se sabe que ésta regula la velocidad de corrosión.



Formación de macroceldas

Como quedó dicho anteriormente, la corrosión en medio acuoso es de naturaleza electroquímica, es decir, la zona que se oxida (ánodo) está separada, al menos un espaciado atómico, de aquella donde el agente oxidante se reduce (cátodo). Por ejemplo, en caso de ataque por cloruros, se observan zonas herrumbradas (picado) relativamente chicas, separadas por áreas comparativamente mucho mayores de acero “limpio”. Este es el fenómeno conocido como formación de macroceldas o macropares galvánicos. Esto acelera la velocidad de corrosión, ya que las áreas anódicas concentradas, deben soportar grandes áreas catódicas.

Entre los factores responsables de la formación de macroceldas de corrosión, se pueden citar las heterogeneidades de la fase metálica (anisotropía de los granos cristalinos, impurezas en la matriz metálica, bordes de grano, regiones sometidas a tensiones y deformaciones plásticas, etc.); heterogeneidades del medio (aireación diferencial, concentraciones salinas diferenciales, zonas de distinto grado de humedad o de pH, etc.); también se ha observado la formación de macroceldas en zonas reparadas y sin reparar.

Solicitaciones mecánicas

En armaduras sometidas a elevadas tensiones (por ejemplo en los casos de pre y postesado) pueden producirse el tipo de ataque conocido como corrosión bajo tensión. Se caracteriza por la aparición de una microfisura en la superficie del acero, que progresa hasta provocar la fractura brusca y frágil del metal, aunque no se manifiesten prácticamente en la superficie, signos de ataque, por lo que es difícil de detectar (y por lo tanto, de tomar medidas preventivas para evitar el colapso estructural).

Acción de bacterias

La variación del contenido de sulfatos, nitritos, nitratos o distintos ácidos de las aguas, puede ser provocada por bacterias que aumentan su agresividad para el hormigón

3.7 DIAGNÓSTICO DE ARMADURAS CORROÍDAS

El diagnóstico de patologías en estructuras de hormigón armado, que terminan con la corrosión de armaduras corroídas, estará basada en tareas “in situ” (en el lugar de localización



de las misma), y en tareas de laboratorio. A continuación se nombran las distintas acciones que pueden realizarse:

Tareas “in situ”

a) Identificación visual de síntomas

Esto es, observar una serie de aspectos, que son indicativos de la posibilidad de existencia de corrosión, como lo serían:

- Ubicación y color de manchas de óxido;
- Manchas de humedad o de carbonatación evidente;
- Aspecto del hormigón;
- Desprendimientos de hormigón;
- Levantamientos, en casos de superficies con revestimientos; y
- Expansiones del hormigón.

a) Identificación de la *agresividad del ambiente*

Observación de todos los factores que rodean a la estructura y que puedan influir en su deterioro, tales como: temperatura, humedad, vientos, presencia de hielo, cercanía del mar, ambientes agresivos químicamente, etc.

b) Observación de las *armaduras*

Para ello, será necesaria la eliminación del recubrimiento en las zonas afectadas, hecho que permitirá obtener informaciones importantes, como por ejemplo:

- Espesor del recubrimiento
- Disminución del diámetro de las armaduras
- Color y aspecto de los óxidos
- Morfología de ataque (localizado, generalizado, existencia de picaduras o fisuras en el acero, etc.)

Tareas de laboratorio

a) Determinación del contenido de Cloruros y/o sulfatos, que pueden provocar expansión en el hormigón, pudiendo llevar a que la armadura quede expuesta al medio ambiente. Esto se realiza por medio de métodos químicos clásicos o espectroscópicos.

- b) Determinación de la profundidad de carbonatación.** La reducción del pH del hormigón, originada en la carbonatación, puede detectarse con indicadores (por ejemplo, la fenolftaleína indica $\text{pH} < 8$ en incoloro (presencia de carbonatación) y $\text{pH} > 10$ en color rojo (zona no carbonatada).
- c) Estimación de la resistencia mecánica del hormigón.** El objetivo es delimitar zonas con distintas resistencias o con deterioros localizados. Con métodos “in situ”, con métodos no destructivos, como por ejemplo: ultrasónicos o esclerométricos, o por métodos destructivos, retirando muestras y ensayándolas en laboratorio.
- d) Determinación del espesor del recubrimiento.** Zonas de recubrimientos menores que los mínimos admisibles, pueden indicar riesgo o elevada posibilidad de corrosión de las armaduras. También se puede efectuar por medio de métodos no destructivos (uso de pachómetros, que indican la presencia y dirección de las barras) o destructivos (removiendo el recubrimiento hasta la armadura).
- e) Determinación de las características de las armaduras.** El diámetro, la posición y el número de barras (mediante un pachómetro), la pérdida de sección por corrosión (mediante gravimetría), etc.
- f) Determinación de la porosidad del hormigón.** Esto puede efectuarse a través del ensayo de porosidad. Este parámetro está definido por [32].

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumer}} \times 100 \quad (3.4)$$

donde:

P_{sat} : peso de la muestra saturada de agua con superficie seca

P_{seco} : peso de la muestra secada a 105°C hasta peso constante

P_{sumer} : peso de la muestra sumergida en agua

Desde el punto de vista práctico, se estima que un valor menor del 10%, es propio de un hormigón de buena calidad y compacto; un valor mayor al 15% indica un hormigón muy permeable.

g) Determinación del contenido de humedad de la masa de hormigón. Esto dará una indicación sobre la posibilidad de propagación de la corrosión de las armaduras en el futuro (velocidad de avance).

h) Determinación del Potencial Electroquímico de Corrosión. Esto permitirá una apreciación cualitativa del estado del proceso de corrosión de las armaduras (activo o pasivo). Esto se realiza mediante un voltímetro, conectando un terminal a la barra de la estructura (descubriéndola) y el otro, a un electrodo de referencia especial (Figura 3.10). Se puede así registrar el Potencial de Corrosión del hierro, comparando este Potencial, con el de un electrodo de referencia (por ejemplo, de Cu – Cu SO₄). La norma ASTM C-876 [33] indica:

$V > -200 \text{ mV}$	90 % de probabilidad de que no exista corrosión (pasivo).
$-350 \text{ mV} < V < -200 \text{ mV}$	actividad corrosiva incierta en la armadura.
$V < -350 \text{ mV}$	90 % de probabilidad de que exista corrosión (activo)

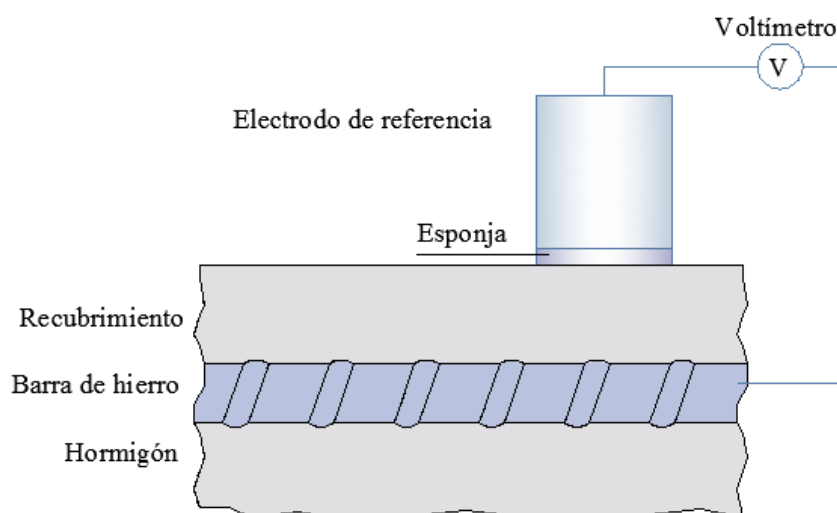


Figura 3.10: Esquema de medición de Potencial Electroquímico

i) Determinación de la Resistividad Eléctrica del hormigón. Es un principio conocido de la Física, que la Intensidad de Corriente (i) está vinculada con el Potencial (V), a través de

la Resistencia (R): $V = i.R$ (Ley de Ohm). Existen métodos que permiten determinar la Resistividad del hormigón ρ (por ejemplo, el método de las cuatro puntas [34]), de manera que puede tenerse una idea aproximada de la magnitud de la velocidad de corrosión a través de la Resistividad [19]. Por ejemplo, en el mencionado método, en la Referencia [35] se considera que:

$\rho > 254 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Velocidad de corrosión despreciable
$37 \text{ k}\Omega.\text{cm} < \rho < 254 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Velocidad de corrosión baja
$21 \text{ k}\Omega.\text{cm} < \rho < 37 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Velocidad de corrosión baja a moderada
$12 \text{ k}\Omega.\text{cm} < \rho < 21 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Velocidad de corrosión alta
$\rho < 12 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	Velocidad muy alta

j) Determinación de la Velocidad de Corrosión. Por cuanto la determinación del Potencial de Corrosión aporta una valoración solamente cualitativa del proceso, existen diversas técnicas electroquímicas que permiten obtener valoraciones cuantitativas. Información sobre la cinética de la corrosión se puede obtener, entre otros métodos, a través de las curvas de polarización (Extrapolación de Tafel), la Resistencia de Polarización, y la impedancia Electroquímica, que se basan en la Teoría de Stern Geary [36,37], partiendo de su conocida ecuación:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3.5)$$

Donde: i_{corr} es la Velocidad de Corrosión; R_p es la Resistencia de Polarización y B es la variación del Potencial en la reacción de corrosión. Esta constante B puede obtenerse a través de la Ecuación 3.6, en función de las pendientes anódica y catódica de Tafel (b_a y b_c).

$$B = \frac{b_a b_c}{2,3 (b_a - b_c)} \quad (3.6)$$

Cabe acotar, que para determinar la Velocidad de Corrosión por el método de la Extrapolación de Tafel, es necesario obtener las curvas de polarización, que representan los procesos de oxidación anódica y de reducción catódica. Para ello se aplican sobre potenciales

en ambos sentidos. Es posible obtener i_{corr} , en la intersección de las pendientes de las ramas anódica y catódica (Figura 3.11).

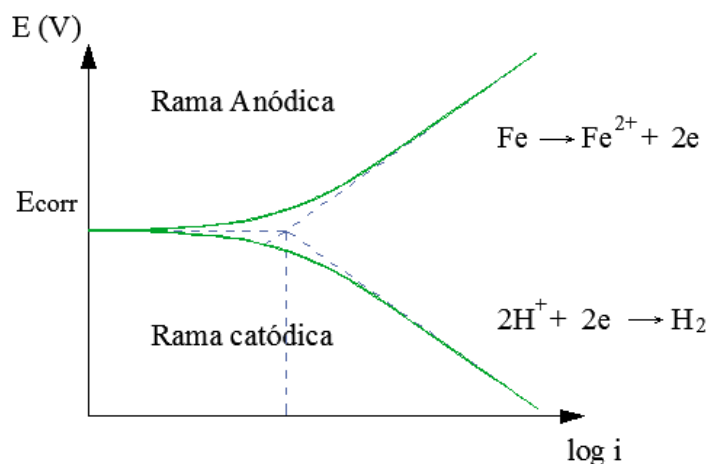


Figura 3.11: Curva de extrapolación de Tafel [38]

Por otra parte, el método de la Resistencia por Polarización, se basa en la aplicación de pequeños sobrepotenciales cercanos al potencial de corrosión. La pendiente de la curva obtenida de polarizar de esta manera el sistema, es la resistencia que ofrece la interfaz metal-solución al paso de la corriente, y es la denominada R_p en la Ecuación 3.5, lo que, conocidas las pendientes de Tafel, permite obtener la Velocidad de Corrosión i_{corr} . Según L. M. Gassa [39], aun cuando se desconozcan b_a y b_c para el sistema bajo estudio, al adoptar cualquier par de valores típicos de las mismas, el error cometido en la determinación del valor final de i_{corr} es despreciable.

También puede emplearse en la determinación de la i_{corr} , el método de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS). Con este método, el valor de R_p puede obtenerse a través de medidas de la Impedancia. Se aplica a la muestra en estudio, una señal de pequeña amplitud de corriente alterna, y se registra la respuesta en el potencial del sistema, a diferentes frecuencias. La impedancia (Z) es la oposición (resistencia) al paso de la señal eléctrica. Por analogía con la corriente continua, se define como: $Z = V(\omega) / i(\omega, \theta)$ (siendo ω : frecuencia y θ : ángulo de fase). Esta ecuación, consta de una componente real y una imaginaria.

Graficando la componente real en función de la imaginaria, puede obtenerse la R_p , para frecuencias tendiendo a cero.

De esta manera, conocida la velocidad de corrosión i_{corr} , puede establecerse el estado de la armadura. Por ejemplo, en la Tabla 3.2, se indica los niveles de daño según la Referencia [40].

Tabla 3.1: Niveles de daño en función de la Velocidad de Corrosión [40]

Velocidad de Corrosión $\mu\text{m} / \text{año}$	Condición del hormigón	Nivel de daño
< 1	Muy seco, sin contaminación de Cl^-	Muy leve
1 - 5	Seco, carbonatado o poco contaminado con Cl^-	Leve
5 - 10	Húmedo, carbonatado o poco contaminado con Cl^-	Moderado
10 - 100	Muy húmedo, carbonatado o contaminado con Cl^-	Alto
> 100	Muy húmedo, carbonatado o muy contaminado con Cl^-	Muy alto

3.8 REFERENCIAS

- [1] Atkins P.W., "Physical Chemistry.", Oxford University Press, London, 1998.
- [2] Bentur A., Diamond S., Berke N.S., "Steel corrosion in concrete Fundamentals and Civil Engineering Practice.", E & FN Spon, London, 1997.
- [3] Tutti K., "Corrosion of steel in concrete.", Swedish Cement and Concrete Institute (CIB), Stockholm, Sweden, 1982, 4-28.
- [4] Mehta P.K., Monteiro P.J.M., "Concrete. Structure, properties and materials.", 2nd ed., Ed. Príncipe Hall, 1993.
- [5] Kayyali O.A., Haque M.N., "Chloride penetration and the ratio Cl^-/OH^- in the pores of cement paste.", Cement and Concrete Research, 18, 6, 1988, 895-900.
- [6] American Concrete Institute, ACI 319-02, "Building Code Requirements for Structural Concrete.", Farmington Hills, MI, USA, 2002.
- [7] INTI, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad par a las Obras Civiles; "CIRSOC 201: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.", Buenos Aires, 2002.
- [8] Biczók I., "Corrosión y protección del hormigón.", Urmo S.A. de Ediciones, 1981.
- [9] Pazini Figueiredo E. J., "Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção dá armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - ao Contribuição Estudo de reparação de

- estructuras de betão armado .", Tese Doto rem Engenharia, Escika Oikutñecbuca Ybuversudade de-sai da Oykim –brasil,. 1994, 1-408.
- [10] Traversa L., “Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales en Durabilidad del Hormigón Estructural.”, Ed. F.E. Irassar, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarría, Argentina, 2001, 217-257.
- [11] European Comité for Standardization; “Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón” ENV 1992.
- [12] Comité Euro International du Betón (CEB-FIP); “Model Code 1990”, Lausana, 1991.
- [13] Ho D.W.S., Lewis R.K., “Carbonation of concrete and its prediction.”, Cement and Concrete Research, 17, 13, 1987, 489-504.
- [14] Vénuat M., Alexander J., “De la carbonatation des bétons.”, Research and development Bulletin, Portland Cement Association, 1958.
- [15] Verbeck, G.; “Carbonation of Hydrated Portland Cement.”, Research and development Bulletin, Portland Cement Association, 1958.
- [16] Auskerm A.B., Horn W.H., “Efect of Curring Conditions on the Capillary Porosity of Hardened Pórtland Cement Pastes.”, jorunal of the American Ceramic Society, 59, 1-2, 1976, 29-33.
- [17] Andrade C., Alonso C., Sarria J., Castellote M.; “Durabilidad de Estructuras de Hormigón: Vida útil, Refuerzo y Reparación.”, XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 1998.
- [18] Do Lago Helene P.R., “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1993, 1-231.
- [19] Traversa L.P., “Cap. 5: Durabilidad del Hormigón Estructural”. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, La Plata, 2001, 217-257.
- [20] Kropp J., Hilsdorf H. D., RILEM Report 12, “Performance Criteria for Concrete Durability”, E & FN Spon, London, 1995.
- [21] Lambert P., Page C.L., Short N.R., “Pore Solution Chemistry of the Hydrated System Tricalcium Silicate/Sodium chloride/Water.”, Cement and Concrete Research, 15, 4, 1985, 675-680.
- [22] Rasheeduzzafer Hussain S.E., Al-Saadoun S.S., “Effect of Tricalcium Aluminate Content on Chloride Binding and Corrosion on Reinforces Steel in Concrete”, ACI Materials Journal, 89, 1992, 3-12.
- [23] Short N.R., Page C.L., “The Diffusion of Chloride Ions trough Portland and Blended Cement Pastes.”, Cement and Concrete Research, 11, .3, 1981, 395-406.
- [24] Page C.L, Short N.R., El Tarras A., “Diffusion of Chloride IOns in Hardened Cemento Pastes.”, Cement and Concrete Research, 11, Is. 151, 1992, 404-411.
- [25] Mangat P.S., Molloy B.T., “Factors influencing Chloride Induced Corrosion of Reinforcement in Concrete.”, Materials and Structures, 25, Is. 181, 1992, 404-411.
- [26] Gjørv O.E, Vennesland φ., “Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete.”, Cement and Concrete Research, 9, 2, 1979, 229-238.
- [27] De Schutter G., “Quantification of the Influence of crack in Concrete Structures on Carbonation and Chloride Penetration.”, Magazine of Concrete Research, UK, 51, N 6, 1999, 427-435.
- [28] Gowripalan N., Sirivatnonon V., Lim C.C., “Chloride Diffusivity of Concrete Cracked in Flexure.”, Cement and Concrete Research, 30, 5, 2000, 725-730.
- [29] Roper H., Baweja D., “Carbonation – Chloride Interactions and their Influence on Corrosion Rates of Steel in Concrete.”, Proceedings of the 2nd. International Conference on the Durability of Concrete, Montreal, 1991, 295-306.



- [30] Zilica V., “Corrosion of Reinforcement Induced by Environment Containing Chloride and carbón dioxide.”, Bulletin of Materials Science, 26, 6, 2003, 605-608.
- [31] Jones D.A., “Principles and Prevention of Corrosion.”, Macmillan Publishing Company, N. York 1992.
- [32] American Society for Testing and Materials, ASTM C 642-97, “Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete.”, Philadelphia, USA., 1997.
- [33] American Society for Testing and Materials, ASTM C 876-91, “Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.”, Philadelphia, USA., 1992.
- [34] FM5-578 - Florida Department of Transportatio ,“Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electical Indicator of its Permeability.”, 2004, 5-578.
- [35] Chini A., “Determination of Acceptance Permeability Characteristics for Performance- Related Specifications for Portland Cement Concrete.”, School of Building Construction, University of Florida, 2003, 354-441.
- [36] Stern M., Geary A.L., “A theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves.”, Journal of Electrochemical Society, 104, 1957, 56-63.
- [37] Stern M., “A method for Determining Corrosion Rates from Linear Plarization Data.”, Corrosion, 14, 9, 1958, 440-444.
- [38] Moreno A.V., López T.P., Madrid M.M., “El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado.”, Instituto Mexicano del Transporte, 2001, 1-74.
- [39] Gassa L.M., “Tecnicas de Evaluación de los Mecanismos de Corrosión del Acero.”, Jornadas Técnicas: Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón. Evaluaión, Diagnóstico y Reparación, Mar del plata, 2002.
- [40] “Manual de Inspección, Evaluación y diagnóstico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado”, CYTED, Red DURAR (Durabilidad de la Armadura), Maracaibo, 1997.

CAPÍTULO 4

GENERACIÓN, GESTIÓN Y POSIBILIDADES DE RECICLADO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN



CAPÍTULO 4

GENERACIÓN, GESTIÓN Y POSIBILIDADES DE RECICLADO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El hombre, durante mucho tiempo, ha utilizado los recursos naturales en función a su propia conveniencia, sin tener en cuenta las consecuencias ambientales que esto implicaba. Esto generó una degradación constante del entorno natural, en el cual, desarrolla sus actividades. Por este motivo, al percibirse este efecto paulatinamente, se fue instalando en el mundo, la necesidad de establecer políticas que mejoren los métodos de aprovechamiento de dichos recursos y su reutilización, si fuese posible.

Los Residuos de Construcción y Demoliciones (RCDs) son generalmente, de naturaleza inerte, con un poder contaminante relativamente bajo. Se originan en el desarrollo de construcciones civiles, y fundamentalmente en demoliciones, reformas y rehabilitaciones de estructuras.

Los residuos de hormigón, son sólo una parte del total de los RCDs generados en cualquier lugar del mundo, los cuales están constituidos también por: ladrillos, tejas, materiales cerámicos, madera, vidrio, plástico, mezclas bituminosas, metales, piedras, tierras, yeso, papel y otros residuos procedentes de la construcción y de las demoliciones [1].

En la mayoría de las ciudades de Argentina, estos desechos son eliminados en vertederos oficiales y un porcentaje importante termina en vertederos clandestinos, donde es habitual encontrarlos mezclados con residuos sólidos urbanos. Esto provoca un considerable impacto visual, debido a la gran cantidad de espacio que ocupan y al escaso control ambiental de los terrenos en que se depositan. Su importante volumen hace que su gestión, valorización y reciclaje sea una tarea de creciente interés. Cabe acotar que existe un porcentaje de estos residuos de demolición que son reciclados en las obras donde se originan, destinados a la construcción de cimientos y contrapisos, o simplemente, como relleno de terrenos.



El reciclado de hormigón, depende de varios factores importantes, a saber: los volúmenes generados, la gestión de los mismos, las normativas vigentes y el impacto económico que esto genera.

En la Argentina, como en muchos países en vías de desarrollo, no existe una legislación adecuada, y en muchos casos, la legislación que existe no se cumple, situaciones que han favorecido a la proliferación de los vertederos clandestinos. Esta situación, lamentablemente, no es privativa de la gestión de los residuos.

Evidentemente, una de las alternativas tendientes a mejorar la sustentabilidad de la construcción es el reciclado de sus residuos o del uso de materiales tradicionalmente desechados en las canteras, como agregados (gruesos y/o finos) en la producción de hormigones. Por ello, se han desarrollado diversos trabajos de investigación que han permitido determinar las principales propiedades de los hormigones realizados con estos agregados [2-4]. Como resultado de estas investigaciones se establecieron recomendaciones para el diseño de hormigones realizados con estos agregados reciclados [5-8].

En este capítulo se describen diferentes aspectos relacionados con la gestión de los RCDs en distintos lugares del mundo, así como también la composición de los mismos y los procesos utilizados para la obtención de agregados reciclados.

También se incorpora un estudio desarrollado en la ciudad de Bahía Blanca, en el cual se detectaron diversos lugares de vertido de residuos de la construcción (oficiales y clandestinos), determinándose los porcentajes aproximados existentes de los distintos residuos. Por otro lado, se investigó la frecuencia de vertido de los residuos de construcción y demolición a través de encuestas realizadas a las empresas de contenedores. Para la tipificación in situ de los residuos de hormigón encontrados en los vertederos, que son los de mayor interés para este trabajo, se emplearon ensayos no destructivos (Impulsos Ultrasónicos y Esclerometría), para tener una noción de la calidad de los mismos. De esta forma, se puede brindar información con el objetivo de:

- a) Conocer las posibilidades del reciclado de residuos de construcción, en especial del hormigón en una ciudad de tamaño medio, como es la ciudad de Bahía Blanca.



- b) Comenzar a diseñar políticas para la gestión de los residuos de construcción, en la ciudad y en el país.

4.2 GENERACIÓN DE RCDs

Los residuos de hormigón tienen su origen en la demolición de estructuras de hormigón armado y pavimentos, como así también en los restos de hormigones de sobrantes de los mixers y que generalmente terminan depositándose en vertederos ilegales. La trituración de este tipo de desechos de construcción da lugar a la generación de materiales granulares, a los cuales se los puede denominar como agregados reciclados de hormigón.

La gestión de los RCDs se realiza en forma desigual, en distintos países del mundo. En muchos países europeos, como consecuencia de medidas de gestión adecuadas y permanentes en el tiempo, los porcentajes de reciclado de los residuos generados son importantes, mientras que en otros países, la cantidad de material reciclado es muy pequeña.

Distintos factores, como la escasez de agregados, la imposición de multas y hasta la prohibición del vertido de los RCDs, así como la concientización e información a las empresas y personas sobre el reciclado, favorece la aplicación del mismo. A nivel mundial, se estima que el 35% de los residuos que se producen son RCDs [9], sin embargo un alto porcentaje de los mismos es depositado en vertederos [10].

Morales, María M. realizó un trabajo de investigación [11], del cual se produce la Figura 4.1 a partir de la información aportada por diferentes estudios sobre el reciclado de RCDs. Dicha figura muestra los porcentajes de RCDs producidos, respecto al total de residuos generados y los porcentajes de reciclado de los mismos, en distintos países del mundo.

Países como Holanda y Dinamarca, con políticas, gestión e investigaciones importantes sobre el reciclado de los RCDs alcanzan niveles de reciclado muy importantes, entre el 80-90% [12]. También se destacan países como Australia o Japón con porcentajes del 51% y 65 % de RCDs reciclados, respectivamente [13]. Mientras que los porcentajes más bajos de reciclado se pueden observar en Brasil, Italia y Noruega, con valores de reciclado inferiores al 10%.

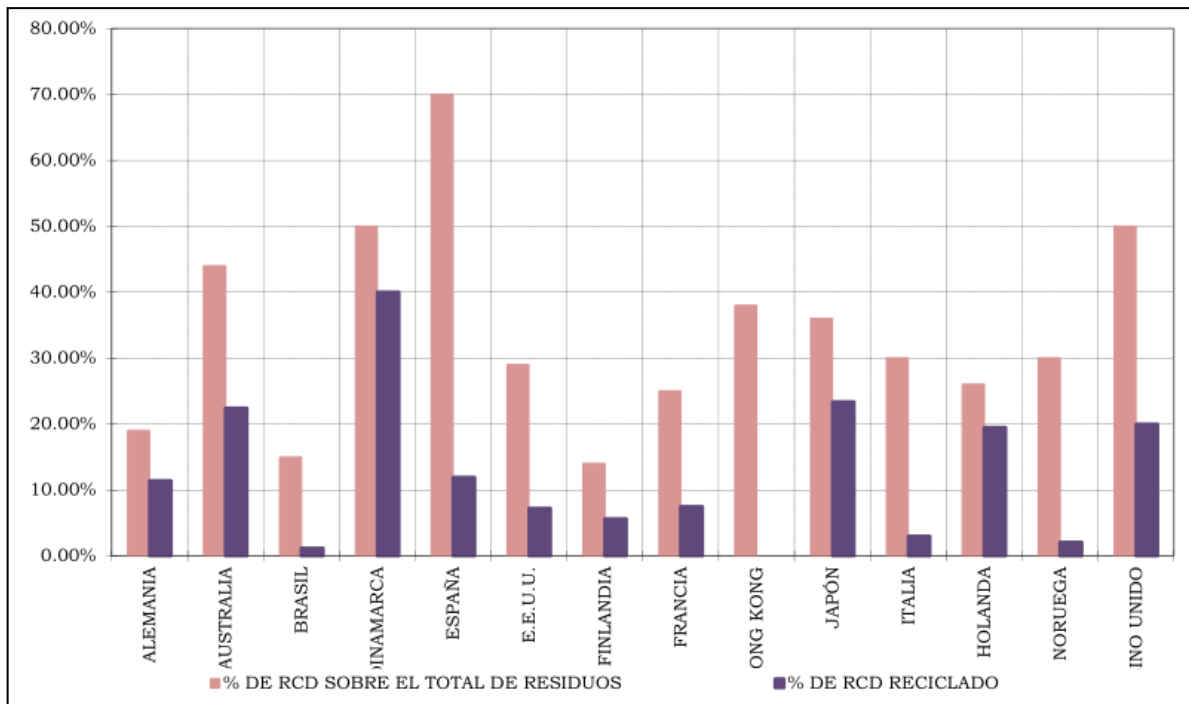


Figura 4.1: Porcentaje de RCDs reciclado sobre el porcentaje de RCDs producido [11]

4.3 PRODUCCIÓN DE AGREGADOS RECICLADOS

El agregado reciclado de hormigón es el único agregado reciclado que se utiliza en la fabricación de hormigón estructural. Para ello, es necesario asegurar que las impurezas presentes en el mismo y sus características particulares, no presenten efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad del mismo. Por este motivo, las normativas existentes para su implementación, toman ciertos recaudos, ya sea en el contenido máximo del mismo, la calidad exigida al mismo o a las limitaciones en cuanto a su utilización se refieren [14-25].

4.3.1 PROCESOS DE PRODUCCION DE AGREGADOS RECICLADOS

La producción de agregados reciclados procedentes de residuos de hormigón se realiza de forma similar al proceso que se emplea para producir agregados naturales de trituración. Las plantas que se emplean con dicha finalidad, incorporan varios tipos de trituradoras, tamizadoras y equipos para eliminar los residuos no deseados.

Las plantas de producción de agregados reciclados pueden operar mediante sistemas abiertos o cerrados; estos últimos presentan un mayor control sobre el tamaño máximo de partícula

obtenido [26]. En la Figura 4.1 se presenta esquemáticamente el funcionamiento de las plantas de producción de agregados con sistemas abiertos y cerrados. Además, estas plantas de producción pueden clasificarse, en función de su capacidad de transporte, en plantas: fijas, semifijas y móviles, contando las primeras con una capacidad de producción muy superior [27].

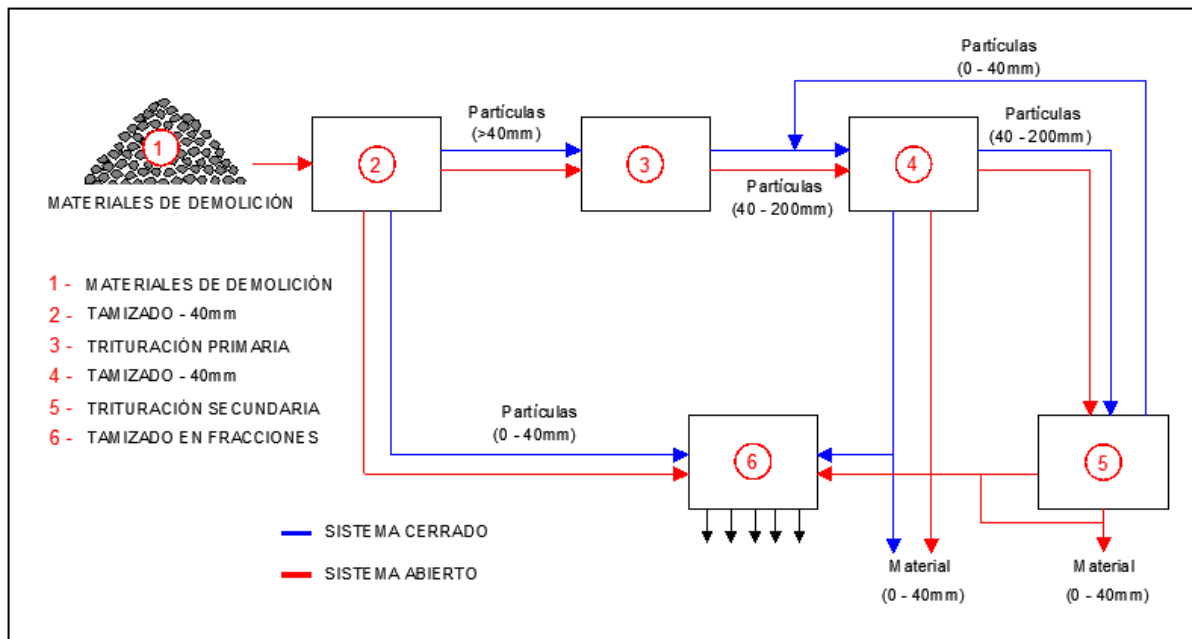


Figura 4.2: Representación esquemática de plantas de producción de agregados reciclados

Estos sistemas permiten obtener agregados gruesos reciclados, si al momento de realizar la separación, quedan retenidos en el tamiz con abertura de malla de 4,75mm, y agregados finos reciclados para los que pasan dicho tamiz, y dentro de este último grupo se encuentra la fracción fina de descarte (0 – 6mm).

Existen diferentes tipos de trituradoras que utilizan las plantas de producción de agregados reciclados, para reducir el tamaño de las partículas. Entre las más utilizadas se encuentran: la trituradora de mandíbula, de conos, de rodillo y de impacto. En las Figuras 4.3 a 4.6 se muestran gráficos esquemáticos de cada una de ellas.

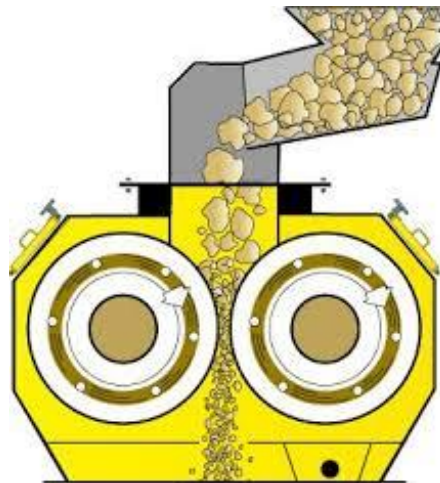


Figura 4.3. Trituradora de rodillos



Figura 4.4. Trituradora de Impacto

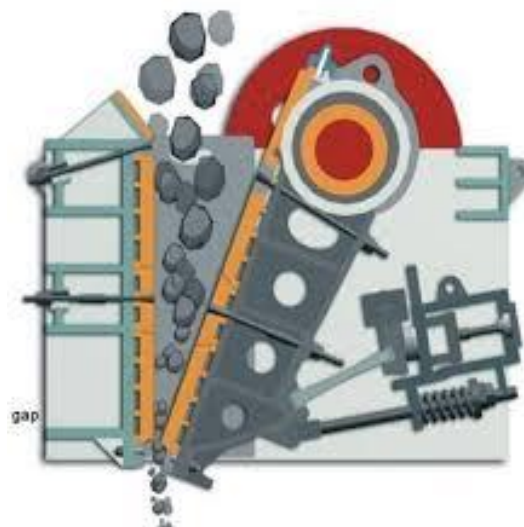


Figura 4.5. Trituradora de mandíbulas

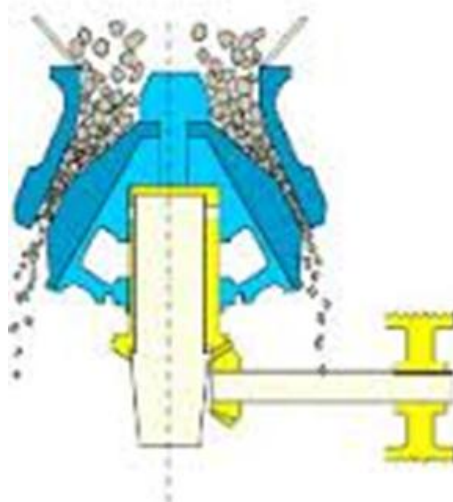


Figura 4.6. Trituradora de Conos

Según los sistemas de procesado y la tecnología con la que cuentan, se clasifican en plantas de 1^a, 2^a y 3^a generación [28]. Las plantas de 1^a generación no incorporan mecanismos para la eliminación de sustancias contaminantes, excepto separadores magnéticos. Las plantas de 2^a generación incorporan, previo a la trituración, sistemas manuales o mecánicos para eliminar contaminantes así como algún sistema de limpieza del producto obtenido, y las plantas de 3^a generación procesan y permiten la reutilización de materiales secundarios considerados contaminantes de los agregados reciclados.

4.3.2 DEMOLICIÓN SELECTIVA

Si los residuos son seleccionados adecuadamente en origen, los sistemas de eliminación de materiales no deseados se ven reducidos sensiblemente. La demolición selectiva se lleva a cabo con el fin de separar y prevenir la mezcla de materiales perjudiciales como madera, cartón, plásticos, etc., de los agregados reciclados que se desean obtener.

Los escombros procedentes de demolición de edificios presentan una baja contaminación, pero si la demolición no se realiza de forma selectiva, el proceso de separación y selección se debe realizar posteriormente, en la planta de reciclaje, esto tiene mayor incidencia en los costos de producción.

Si bien, el proceso de demolición selectiva resulta más costoso que la demolición tradicional, esto se compensa al reducirse los costos de transporte y los impuestos por vertido (en aquellos

países en los que esto se implementa). Además genera la reutilización directa de diversos materiales que se hubiesen destinado al vertido y que representan aproximadamente el 65% de la del volumen total demolido [27].

Este proceso comienza con el desmantelamiento de las molduras y sacando los desechos, posteriormente, se desmantela la carpintería (puertas, ventanas, etc.), luego la cubierta y las instalaciones (agua, desagües cloacales, electricidad, gas, etc.). Luego se demuele la tabiquería y, por último, se procede a la demolición de la estructura, en caso que la misma sea independiente de la mampostería.

4.3.3 ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS

Generalmente, la eliminación de impurezas y contaminantes en el agregado reciclado se realiza mediante tamizado, con separadores magnéticos y de forma manual. También existen técnicas con aire y agua que permiten la eliminación de materiales ligeros como la madera, los plásticos y el papel. Los residuos de otros materiales metálicos como el cobre, el zinc, el aluminio, el plomo o las aleaciones de ellos se separan, por lo general, manualmente.

También se podrían aplicar otras formas de separación de impurezas, aunque aún no son aplicadas en las plantas de reciclaje. Una de ellas, está basada en la generación de un campo magnético variable, donde los materiales conductores se separan por repulsión de los metales no magnéticos y no férricos. La otra forma propone la separación magnética por densidad en seco [29] y utiliza la susceptibilidad magnética de los materiales de mortero y los cerámicos, logrando que su distinto contenido en óxido de hierro permita la separación.

La separación de materiales de baja densidad puede realizarse en seco o por vía húmeda. En seco se lleva a cabo una separación manual previa y, posteriormente, se utilizan corrientes de aire. Por vía húmeda la separación se consigue haciendo pasar los materiales a contracorriente sobre chorros de agua.

Se han desarrollado otros tratamientos con los que se busca separar, casi en su totalidad, el mortero adherido al agregado [30,31]. Estos sistemas son generalmente sistemas costosos y de poca aplicación.



4.4 TRABAJO DE CAMPO EN LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA

4.4.1 MÉTODO

La ciudad de Bahía Blanca, es una ciudad de tamaño medio dentro de Argentina, con una población de aproximadamente 350.000 habitantes, ubicada a unos 700 km al sur de la ciudad Autónoma de Buenos Aires, y en los últimos años, ha tenido un importante crecimiento en la actividad de la construcción, impulsado por la existencia del puerto de aguas profundas más importante del país, un pujante polo petroquímico, y por la existencia de dos universidades nacionales, otras privadas y dos instituciones educativas terciarias, lo que aumenta la demanda de viviendas e infraestructura. Esto motivó la realización de un estudio, por parte del autor, en el año 2009, en dicha ciudad, sobre los volúmenes de desechos de construcción y demolición generados, en especial de hormigón, analizando su gestión y las posibilidades de reciclado.

4.4.2 RELEVAMIENTO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN

En Bahía Blanca, los principales componentes de los residuos de la construcción son: hormigón, mampostería (de ladrillos macizos y huecos, y en menor proporción blocks de hormigón), tejas, baldosas, tierra y distintos tipos de piedras (mayoritariamente, calcáreas), que son las que habitualmente se encuentran en los niveles superiores del terreno.

La generación de residuos en las obras de construcción puede ser debida a varias causas, por ejemplo, demolición parcial o total de una construcción existente, la falta de coordinación entre el diseño arquitectónico y estructural, cambios in situ de las dimensiones de elementos proyectados originalmente, mala manipulación y transporte de materiales, fallas en el proceso de montaje, etc.

4.4.3 PROPORCIONES DE LOS DIFERENTES MATERIALES

Con el fin de determinar las proporciones de los diferentes materiales dentro de los residuos de construcción, se realizó un relevamiento de los volúmenes de cada uno de ellos, entre los vertederos detectados en la ciudad. En la Figura 4.7 y en el Apéndice A se muestran algunas

fotos de los lugares de vertido en los que se realizaron las determinaciones pertinentes. Este estudio se realizó en el período comprendido entre marzo y mayo del año 2009.



Figura 4.7: Fotografías en lugares de vertido de residuos de construcción y demolición relevados

Algunos de estos vertederos se encuentran en terrenos públicos, en zonas de difícil acceso o descampadas, y otros en terrenos privados, cuyos dueños permiten el vertido de los desechos de construcción, para su posterior comercialización.

El relevamiento realizado cubre un gran porcentaje de los residuos generados, que no son reutilizados en el lugar de origen. Los materiales relevados fueron clasificados en los tipos que se presentan en la Tabla 4.1.

Cabe acotar que en la clasificación de la Tabla 4.1, con la denominación de Tipo 4, se incluyen materiales que habitualmente se emplean para realizar hormigones de contrapisos o rellenos, debido a que poseen baja resistencia. Normalmente, junto con la tierra (material Tipo 6) hay materiales, tales como ladrillos, hormigón, etc., que dificultan su uso como relleno superficial de terrenos.

Tabla 4.1: Clasificación de materiales relevados

Tipo	Material
1	Fragmentos de losas de hormigón elaborados con piedra partida
2	Fragmentos de losas de hormigón elaborados con canto rodado
3	Elementos prefabricados de hormigón con piedra partida
4	Fragmentos varios: ladrillos, tejas, baldosas, revoques
5	Restos de pavimentos asfálticos
6	Tierra proveniente de excavaciones y nivelación de terrenos
7	Piedra proveniente de excavaciones y nivelación de terrenos

Los lugares relevados se ubican en diferentes sectores de la ciudad, como se puede apreciar en la Tabla 4.2. Es importante destacar que sólo el primero de los vertederos clasificados en dicha tabla, es un lugar donde la gestión de los residuos está a cargo de la municipalidad. Los restantes lugares son sitios clandestinos donde ciudadanos y empresas privadas han depositado los residuos que retiran de las obras. En algunos casos, a solicitud de los dueños de los terrenos, estos residuos son usados como relleno. Otro aspecto a considerar, es la alejada ubicación del vertedero oficial de la ciudad (A), como se puede observar en la Figura 4.8, motivando que los residuos de construcción y demolición, en muchas ocasiones se arrojen en lugares clandestinos más cercanos al lugar de origen.

Tabla 4.2: Designación de vertederos relevados

Designación	Ubicación	Sector de la ciudad
A	Calle Belisario Roldán (vertedero habilitado)	Sudoeste
B	Ruta 3 Sur	Sudoeste
C	Calle Saliqueló	Noreste
D	Camino Carrindanga	Norte
E	Avenida Cabrera	Norte
F	Ruta 3 Norte	Sudeste



Figura 4.8: Ubicación de los vertederos de inertes en la ciudad de Bahía Blanca

4.4.4 CANTIDAD DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN GENERADOS

Para determinar la cantidad de residuos generados por habitante y por día se realizaron encuestas a las empresas proveedoras de contenedores, encargadas de desechar los residuos de construcción en los vertederos. Estas empresas tienen un registro de la cantidad de contenedores solicitados anualmente, y además, en base a su experiencia, cuentan con información valiosa para la estimación de volúmenes de residuos de construcción manipulados.

4.4.5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS SOBRE ELEMENTOS DE HORMIGÓN

Para la tipificación de los desechos de hormigón relevados, se realizaron Ensayos No Destructivos (END) de Esclerometría y Velocidad de Propagación de Ultrasonido, como se observa en la Figura 4.9, cuyos resultados se detallarán posteriormente.



Figura 4.9: Ensayos no destructivos sobre elementos de hormigón

4.5 RESULTADOS

4.5.1 PROPORCIONES DE LOS DIFERENTES MATERIALES

En la Tabla 4.3, se puede apreciar el total de residuos de la construcción relevados en cada uno de los vertederos, dando un volumen total de 5.190 m³. Teniendo en cuenta los volúmenes relevados, se puede determinar el porcentaje de influencia de cada vertedero en el total de residuos relevados.

Tabla 4.3: Volumen de residuos de construcción según el vertedero.

Lugar	Volumen (m ³)	Porcentaje (%)
A	2.780	54
B	360	6
C	190	4
D	240	5
E	1450	28
F	170	3
Total	5.190	100

Se realizó una clasificación volumétrica, en función del tipo de residuo de construcción (Tabla 4.4). Cabe acotar que dentro de las estas tipologías, la Tipo 4 está constituida mayoritariamente por mampostería, tejas, baldosas, revoques, etc., y por provenir de la demolición de viviendas, también hay un porcentaje reducido de hormigones de encadenados, cuya separación de los restantes residuos es casi imposible.

La mayoría de las viviendas demolidas poseen más de 70 años, época en la que no era muy habitual el empleo de hormigón para la construcción de techos o entrepisos, por lo que hay un porcentaje muy reducido del mismo

Tabla 4.4: Volumen de residuos de construcción según el tipo de material

Tipo	Volumen (m ³)
1	2.030
2	200
3	190
4	1610
5	260
6	680
7	220
Total	5.190

Con los datos de la Tabla 4.4, se puede representar (Figura 4.10) la influencia de cada material en el total de residuos relevados, agrupando todos los residuos de hormigón (Tipos 1, 2 y 3) en un mismo grupo porcentual.

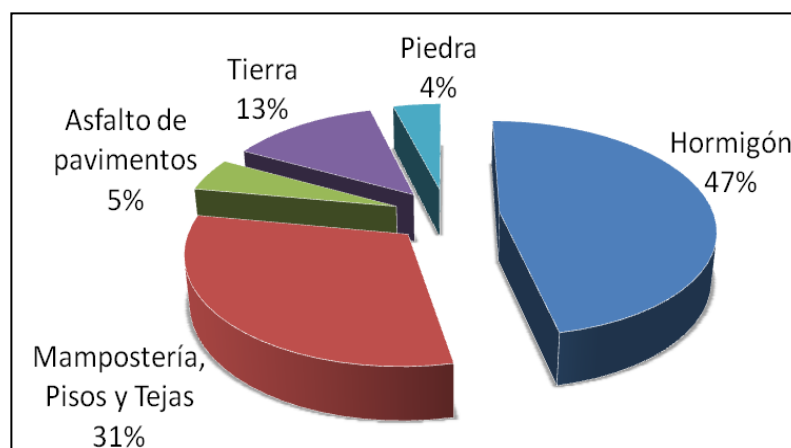


Figura 4.10: Porcentaje de cada tipo de material relevado

4.5.2 CANTIDAD DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN GENERADOS

De acuerdo a las encuestas realizadas a las empresas que gestionan contenedores de residuos de construcción, la cantidad total de contenedores solicitados anualmente en la ciudad es de unos 22.000 contenedores. De acuerdo con el relevamiento efectuado se ha estimado que las empresas consultadas gestionan el 80% de los residuos de construcción generados y que el 60 % del volumen de los contenedores utilizados para la descarga de residuos de construcción son ocupados por residuos urbanos (desechos domiciliarios, poda de árboles, etc). Esta situación se muestra en la Figura 4.11.

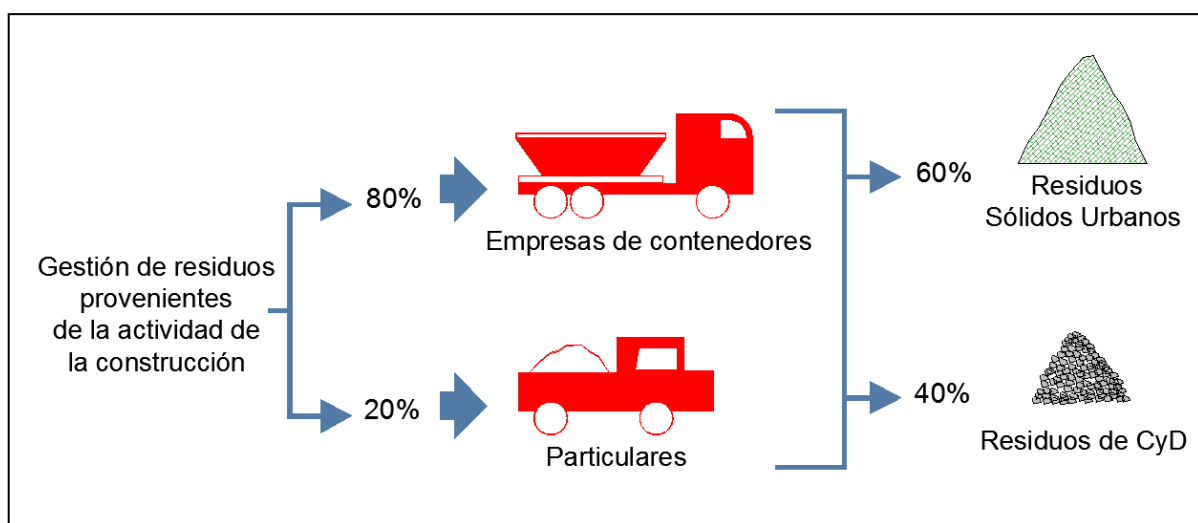


Figura 4.11: Esquema de proporciones de residuos gestionados

Teniendo en cuenta estas consideraciones y sabiendo que el volumen de cada contenedor es de 5 m^3 , se puede estimar que la producción en volumen de residuos de la construcción por habitante y por año, mediante la Ecuación 4.1.

$$V = \frac{C \cdot V_c \cdot R_1}{R_2 \cdot H} = \frac{22000 \text{ cont/año} \cdot 5 \text{ m}^3 \cdot 0,4}{0,8 \cdot 350.000 \text{ hab}} \quad (4.1)$$

$$V = 0,16 \text{ m}^3/\text{hab. año}$$

Donde:

V : Volumen anual de residuos de construcción y demolición generados por habitante por año, en Bahía Blanca.

C : Cantidad de contenedores gestionados anualmente.

V_c : Volumen de un contenedor.



H : Cantidad de habitantes de la ciudad de Bahía Blanca.

R_1 : Coeficiente indicador del 40% de los residuos gestionados, correspondientes a Residuos de Construcción y Demolición.

R_2 : Coeficiente indicador que las empresas consultadas gestionan el 80% de los residuos de construcción generados.

Por otro lado, estimando que la densidad de los residuos de construcción es de $\gamma = 1500 \text{ kg/m}^3$, se obtiene un peso de residuos de construcción generado por habitante por año mediante la Ecuación 4.2.

$$R = V \cdot \delta_R \quad (4.2)$$

$$R = 240 \text{ kg/hab. año}$$

Donde:

R : Cantidad anual de residuos de construcción y demolición en kg, generados por habitante por año, en Bahía Blanca.

V : Volumen anual de residuos de construcción y demolición generados por habitante por año, en Bahía Blanca.

γ_R : Densidad de los residuos de construcción y demolición.

4.5.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Se realizaron ensayos no destructivos (Esclerometría y Velocidad de Propagación de Impulsos Ultrasonidos) en diferentes muestras que se encontraron en los sitios relevados, para estimar la resistencia a compresión del hormigón. A continuación se presenta un detalle de las muestras analizadas:

- Muestra 1: Pavimento de hormigón simple de piedra partida (espesor = 15 cm)
- Muestra 2: Pavimento de hormigón simple de piedra partida (espesor = 20 cm)
- Muestra 3: Losa de hormigón elaborado con piedra partida
- Muestra 4: Hormigón prefabricado de piedra partida (apoyo cañerías o equipos)
- Muestra 5: Pavimento de hormigón armado con piedra partida (espesor = 30 cm)
- Muestra 6: Pavimento de hormigón armado elaborado con piedra partida
- Muestra 7: Pavimento de hormigón armado elaborado con canto rodado
- Muestra 8: Base de equipos de hormigón elaborado con canto rodado

4.5.3.1 Método Esclerométrico

Este END permite determinar la dureza superficial del hormigón, con la que se puede inferir su resistencia mecánica a compresión. En ensayos en hormigón, habitualmente se usa el Esclerómetro tipo Schmidt, para determinar el Índice de Rebote o Índice Esclerométrico (IE) [32]. Este ensayo provee información aproximada de la calidad del material, debido a que el hormigón que está en un vertedero, puede tener una edad de 20 años o más, por lo que es posible que su superficie se encuentre carbonatada, por lo que aumenta ficticiamente su dureza superficial. Ello llevaría a inferir una mayor resistencia que la real. No obstante este inconveniente, con el uso combinado de la determinación de la velocidad de propagación de ultrasonidos, se puede realizar una adecuada caracterización de un material.

En este trabajo se aplicaron 10 golpes, para el promedio considerado en cada muestra y se despreciaron las mediciones que diferían en más de un 10 % del valor medio. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.5, donde se incluye el valor estimado de la resistencia, determinado mediante el empleo de las curvas de calibración aportadas por el fabricante, que con una periodicidad anual son taradas mediante ensayos de laboratorio.

4.5.3.2 Método de la Velocidad de Propagación de Ultrasonidos

El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en hacer pasar ondas de alta frecuencia por la masa del hormigón. Conociendo la distancia entre el transductor emisor y el receptor y mediante el uso de un circuito, que convierte la señal acústica en electrónica, se determina el tiempo de tránsito, con el cual se obtiene la Velocidad de Propagación de Ultrasonido (VU) [32]. En la Tabla 4.5 se exponen los valores obtenidos en las muestras testeadas en campo, por promedio de tres mediciones.

Para el hormigón endurecido, es posible demostrar que cambios en la VU, son proporcionales al contenido de cavidades, estructura de poros, fisuras y microfisuras en el material. Además, se sabe que durante el proceso de fraguado, dicha velocidad aumenta rápidamente, a medida que el hormigón gana resistencia. En términos generales, se puede decir que en los hormigones, a mayores VU se tienen mayores resistencias mecánicas. Por este motivo, esta es una de las técnicas más confiables y utilizadas como END, que es un excelente complemento

de la Esclerometría, debido a que una determina el estado superficial y la otra la situación en el interior del material estudiado.

Tabla 4.5. Resultados ensayos no destructivos

Muestra	Esclerometría		Ultrasonido
	IE	Resistencia (kg/cm ²)	Velocidad (m/s)
1	30	200	1.786
2	35	270	1.799
3	28	170	2.030
4	25	150	1.905
5	30	200	1.911
6	36	290	3.101
7	38	300	2.770
8	35	270	2.198

4.6 DISCUSIÓN

Como se puede apreciar en la Tabla 4.3, en el vertedero oficialmente habilitado de la ciudad se deposita poco más del 50 % de los residuos de construcción existentes, esto indica que hay un porcentaje muy importante de los residuos gestionados en forma clandestina. El porcentaje de residuos que se gestiona clandestinamente, en estos momentos, seguramente es superior al 50 %, debido a que el vertedero E, estaba operando desde unos 3 años antes del estudio, conteniendo casi el 30 % del total de los residuos, detectándose que en el vertedero oficial (A), un porcentaje importante de los residuos relevados estaban depositados con más de 5 años de anterioridad a la realización del estudio.

El vertedero oficial de residuos de la construcción está en una ubicación muy próxima al mar. Aunque el viento dominante en la zona de Bahía Blanca es desde el continente hacia el mar, estos residuos tienen un cierto grado de contaminación con cloruros, por lo que antes de su reciclado en nuevos hormigones que estén en contacto con armaduras, debería realizarse un estudio de la penetración de cloruros en este material.

La presencia de una gran cantidad de vertederos clandestinos no es un problema únicamente de Bahía Blanca; diferentes estudios realizados en otros países del tercer mundo, por ejemplo



en Tailandia, muestran que la mayoría de los residuos de construcción se gestionaban en sitios inadecuados y sin control [33, 34]. Para evitar esto, en Tailandia se han dictado severas leyes que prohíben el funcionamiento de los vertederos clandestinos y se les delega a las administraciones locales la elaboración de ordenanzas y reglamentos de gestión de residuos sólidos [35].

Con relación a la situación que se produce en países desarrollados, se puede decir que la información disponible, indica que la generación de residuos de construcción y demolición es muy variable de un país a otro [36]. En 1996, la cantidad estos residuos en Austria, Dinamarca y Países Bajos se acercaba a 3.000, 500 y 2.600 kg/hab/año, respectivamente. También se determinó que en 1997, los residuos generados en Finlandia, Italia y Luxemburgo se aproximaban a 300, 400 y 610 kg/hab/año, respectivamente. Mientras que en España, en 1999, se acercaban a 500 kg/hab/año.

La cantidad de residuos de la construcción generados en Bahía Blanca es mucho menor, a la producida en los países desarrollados, no obstante, el volumen anual generado es de cierta importancia, ascendiendo a 240 kg/hab/año, lo que implica que el reciclado, sería una importante herramienta en la gestión de los mismos. De acuerdo a los relevamientos realizados, la mayor proporción de los residuos de construcción existentes está formada por hormigón (47 %), que equivalen aproximadamente a unos 25000 m³, en su gran mayoría pertenecientes a carreteras o calles demolidas. El otro grupo de mayor volumen, es el compuesto por mampostería, pisos y tejas (31 %), generado principalmente en la demolición y reforma de viviendas.

Los valores observados en la ciudad de Bahía Blanca pueden compararse con los resultados obtenidos en otra investigación similar realizada en Florida, USA [37], los cuales muestran proporciones similares de composición de residuos, siendo en el caso del hormigón del 56 %, mientras que la suma entre los porcentajes de madera, fragmentos de placas y escombros asciende a un 32 %, lo que se puede comparar con los residuos Tipo 4 de esta investigación, teniendo en cuenta que las construcciones en Florida son realizadas mayormente con madera y placas, mientras que en Argentina la mampostería es mayoritariamente de ladrillos. También el porcentaje de residuos de asfalto es muy similar, siendo del orden del 5 % en Bahía Blanca y del 7 % en Florida. Con respecto a la cantidad de residuos generados en un año, el valor obtenido para Florida, en el año 2000, fue de 470 kg/hab/año, el cual es muy



superior al de Bahía Blanca, que como ya se ha dicho es de 240 kg/hab/año. Esta diferencia parece razonable considerando que el PBI de USA, es muy superior al de nuestro país.

Los datos obtenidos respecto a los residuos de construcción y demolición en Kuwait [38], muestran diferentes proporciones en los materiales, que los determinados en este trabajo. Allí, el hormigón y los ladrillos cuentan con el mismo porcentaje (30 %), seguidos por la arena, con un 25 %, y la madera 8 %. Evidentemente, estas diferencias tienen que ver con los usos y costumbres relacionados a la actividad de la construcción, propios de cada lugar.

Teniendo en cuenta los volúmenes ocupados por los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Bahía Blanca, el reciclado de los mismos tendría que ser el camino a seguir, observando que esta herramienta de gestión ambiental es usada por muchos países del mundo, como es el caso de Dinamarca, cuyo porcentaje de reciclado de residuos de construcción y demolición es superior al 80 %. Por otro lado, en Alemania, Países Bajos, Finlandia e Irlanda reciclan entre el 30 % y el 50 %, mientras que el porcentaje de reciclado en Luxemburgo es de solo el 10 % [36].

Es importante destacar que, no sólo se deben concentrar los esfuerzos en el reciclado, para reducir los residuos de construcción, también es fundamental disminuir la producción de los mismos, y se debe realizar una clasificación en origen de los diferentes materiales antes de ser arrojados en los vertederos o ser reciclados. Una investigación realizada en Hong Kong [39], muestra una alternativa para garantizar que todos los residuos de demolición sean aceptables para el reciclaje, proponiendo la modificación del método tradicional de demolición y la introducción de un método de *demolición selectiva*. Este método requiere que, antes y durante el proceso de demolición se lleve a cabo una breve selección de los diferentes tipos de materiales, para evitar cualquier contaminación, como ocurre con la tierra que se observó en los distintos vertederos de Bahía Blanca.

Utilizando los valores obtenidos en los ensayos de esclerometría se puede estimar la resistencia a la compresión de los hormigones ensayados, aunque se debe tener en cuenta que los resultados de este tipo de ensayos pueden estar afectados por el aspecto superficial, textura y las condiciones de humedad de la superficie de la pieza de hormigón, entre otras [32]; además, del incremento de los valores de las mediciones, por el endurecimiento superficial.



Igualmente todos los ensayos, tanto de esclerometría como de ultrasonido se realizaron en hormigones en condición seca.

Los resultados de los ensayos de UV, muestran velocidades bajas de propagación de los impulsos electromagnéticos, entre 2.700 y 3.000 m/seg, las cuales no pueden ser utilizadas para hacer una correlación con la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta que los rangos de velocidades en los que se encuentran los hormigones de menor calidad varían entre los 3000 y 4000 m/seg.

Estas bajas velocidades se pueden deber, por un lado a que todos los ensayos se realizaron en forma indirecta, es decir con los dos electrodos sobre la misma superficie del hormigón, lo cual provoca una menor sensibilidad del equipo, donde las velocidades de propagación usualmente tienen la influencia de la capa de hormigón cercana a la superficie, que no serán representativas del hormigón en estratos más profundos y con una longitud de la trayectoria de onda menos definida. Además, puede deberse a la fisuración interna del hormigón como consecuencia de su demolición, manipuleo y exposición en los lugares de vertido a distintos cambios térmicos.

No obstante, se puede observar en la Tabla 4.5, que existe una cierta correlación entre los valores del IE y UV en la mayoría de las muestras, lo que indica una coherencia en los resultados obtenidos. Es importante destacar que los métodos no destructivos pueden ser útiles al momento de clasificar en forma rápida los residuos de hormigón, realizando una comparación cualitativa su calidades, teniendo en cuenta que existe una correlación entre la calidad del hormigón utilizado como agregado y el nuevo hormigón obtenido [40].

4.7 ACTUALIDAD DEL RECICLADO DE HORMIGÓN EN ARGENTINA

Actualmente, en la ciudad de Bahía Blanca, así como en muchas ciudades de Argentina, se utilizan los agregados reciclados de hormigón, junto con otro tipo de escombros, para la elaboración hormigones de calidades menores (H10 - H13), usualmente solicitados para la construcción de contrapisos.

En las ciudades de mayor envergadura, como Buenos Aires, donde los volúmenes que comercializan las empresas hormigoneras son muy importantes y teniendo en cuenta que el



metro cúbico de agregado reciclado de hormigón es aproximadamente U\$S 8, inferior al del agregado natural, el beneficio económico es considerable. Esto ha motivado, por un lado, el montaje de plantas de reciclado de hormigón y por otro, el uso del agregado reciclado, no solo para hormigones de calidad inferior, sino que también para la elaboración de los hormigones estructurales de calidades más usuales (H25 - H30).

Este presente en el reciclado de hormigón, es alentador desde el punto de vista de la sustentabilidad y la protección del ambiente, sin embargo, la implementación del reciclado de hormigón debería tener una reglamentación adecuada, donde se determinen los límites de agregado a reemplazar y se establezcan ciertos parámetros a cumplimentar para la utilización de los mismos, como así también una normativa que determine las formas o métodos de selección y acopio de los hormigones de demolición a reciclar.

4.8 APLICACIONES DEL HORMIGÓN RECICLADO EN EL MUNDO

Aunque a nivel práctico el uso del hormigón reciclado es reducido en todo el mundo, existen algunos casos en los que se han utilizado o está previsto utilizar agregados reciclados, como las obras que se mencionan a continuación [41]:

Puente Marina Seca del Forum 2004 de Barcelona - España

El puente Marina Seca, una de las obras emblemáticas del Forum 2004 de Barcelona, fue construido utilizando hormigón reciclado en alguno de sus elementos. Se realizó una sustitución del 20% de agregado reciclado previamente presaturado, con un grado de saturación entre el 80 y el 90%.

La resistencia obtenida fue de $47,8 \text{ N/mm}^2$, y los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados. La puesta en obra de este hormigón tampoco presentó ninguna dificultad.

Viaducto en la carretera RW32 cerca de Meppel – Países Bajos

En 1988 se empleó aproximadamente 500 m^3 de hormigón reciclado en la construcción de los estribos de este viaducto, y en 1990 se construyó un segundo viaducto en esa misma zona. En este caso se utilizó agregado grueso reciclado (en un porcentaje del 20%) para todas las partes de hormigón del viaducto. La cantidad total de hormigón reciclado que se usó fue de 11.000 m^3 .



Construcción de un bloque de oficinas en Watford – Inglaterra

En esta obra realizada en 1995, se empleó hormigón triturado procedente de la demolición de un edificio de 12 plantas en el centro de Londres. El agregado grueso se utilizó para la construcción de cimentaciones, pilares y losas.

Compuerta en el puerto de Antwerp - Bélgica

En 1987 se procedió a la demolición de varios muros en este puerto, generándose 80.000 m³ de escombros. Por motivos ambientales y económicos se optó por realizar hormigón reciclado para la construcción de la nueva compuerta. El hormigón producido disponía de suficiente resistencia a la compresión (35 N/mm²). Para mejorar la trabajabilidad del hormigón se optó por presaturar el agregado reciclado antes de incorporarlo a la mezcla, corrigiendo así la cantidad de agua añadida.

Centro de Exposiciones de Magdeburg – Alemania

En 1999 se usó agregado grueso reciclado para la construcción de grandes bloques de hormigón, como elementos decorativos del lugar. Los mismos se encuentran en el exterior y en contacto con agua.

Sede de la fundación Alemana para el Ambiente (Deutsche Bundesstiftung Umwelt)

En 1993-1994 se construyó esta sede, en la que se empleó agregado reciclado para la construcción de los elementos estructurales de hormigón, realizándose una estricta selección de los agregados reciclados y un exhaustivo control de calidad.

Elementos prefabricados – Japón

En Japón se emplean los agregados reciclados fundamentalmente como material para la fabricación de bloques de hormigón prefabricados.

4.9 NORMAS Y RECOMENDACIONES RELACIONADAS CON EL HORMIGÓN RECICLADO

A continuación se mencionan algunas de las normas y recomendaciones editadas por distintos países, relacionadas con el reciclado de hormigones:



España [14]:

- La última edición EHE (2008) - Anejo 15, recoge las recomendaciones especificadas sobre la utilización en hormigón estructural, del árido reciclado procedente de hormigón. Además, la utilización en hormigón no estructural, de árido reciclado procedente de hormigón está incluida en el Anejo 18 de la EHE.

RILEM [15]:

- RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”. Materials and Structures, Nº 27. p.p. 557-559,1994.

Japón [16-18]:

- “Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete”. Building Contractors Society of Japan (BCS). 1997.
- “Proposed Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Structures Made Using Recycled Aggregate”, 1986.
- “Proposed Specification for Concrete Containing Recycled Coarse aggregate”.

Alemania [19]:

- DIN 4226-1:2000: “Concrete Aggregate”.

Inglaterra [20-23]:

- BSG “Use of industrial by products and waste materials in building engineering”. British Standard Guide 6543, 1985.
- “Recycled Aggregates: BRE digest 433”, 1998.
- “Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392”.
- BS 8500-2:2002 “concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete”.
- WRAP “Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates”. 2002.

Brasil [24]:

- “Recycled Aggregate Standardization in Brazil”. Univesidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté. 2004.



Francia [25]:

- Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France: Iles bétons ET produits de démolition recycles-LCPC, Paris, 1996.

4.10 RECOMENDACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS

A continuación se mencionan recomendaciones que conviene seguir, en lo referente a la gestión de los residuos de la industria de la construcción en Argentina, de acuerdo a la realidad local y a lo realizado en otros países del mundo:

- a- Desarrollar una legislación adecuada para el control del vertido de estos residuos.
- b- Establecer políticas claras que incentiven el reciclado de materiales de construcción, brindando exenciones impositivas a las empresas constructoras que utilicen materiales reciclados.
- c- Fomentar el reciclado de estos residuos, realizando campañas de capacitación y concientización.
- d- Otorgar beneficios impositivos a las empresas constructoras y de demolición que lleven a cabo una separación previa de los residuos generados, antes de depositarlos en los sitios habilitados.
- e- Ubicar los sitios habilitados de vertido en puntos estratégicos de la ciudad, para que la mala e incómoda ubicación de los mismos no sea un motivo para la eliminación de los residuos de construcción en vertederos clandestinos. Los lugares donde emplazar los sitios habilitados deberían estar en distintos sectores de la ciudad y alejados al menos 1000 m de la costa.
- f- Establecer control e importantes multas a quienes vuelquen RCDs fuera de los lugares habilitados para el vertido.
- g- Dejar en manos privadas la gestión de los sitios habilitados de vertido de la ciudad, donde se realice la separación, tratamiento y comercialización de los residuos de construcción y demolición para su reciclado, brindando beneficios legales e impositivos para que esta actividad resulte redituable, a quienes la desarrollen.



4.11 CONCLUSIONES

Existen una gran cantidad de vertederos clandestinos en Bahía Blanca, así como en muchas ciudades de Argentina, los cuales deberían eliminarse. En otros lugares del mundo hay reglamentaciones que se implementan para solucionar esta problemática, las cuales podrían ser consideradas por el gobierno local, como punto de partida para tomar medidas en este tema.

En la mayor parte de Argentina, sólo se recicla un porcentaje pequeño de los residuos de construcción y demolición, destinándolos únicamente a la construcción de cimientos y contrapisos, o simplemente, son usados como relleno para nivelar el terreno. Sin embargo, en muchos países, el reciclado de estos residuos se aplica con éxito y en porcentajes considerables, siguiendo normas para su implementación.

Los ensayos no destructivos pueden servir para estimar la calidad de los residuos de hormigón, la cual va a estar relacionada con la calidad del nuevo hormigón elaborado utilizando al mismo como agregado, pero sería más conveniente aplicarlas antes de realizar la demolición, para realizar una selección previa del material a reciclar, sin que esté afectado (fisurado) por las tareas de demolición. Dependiendo de las necesidades que se tenga con el nuevo hormigón, se podrían sacar testigos, previamente a realizar la demolición.

La mayor parte de los residuos de construcción y demolición (casi el 50%) en la ciudad de Bahía Blanca, está formada por hormigón, esto equivale a un volumen importante de material a ser reciclado. Además, se puede contar con experiencias positivas, realizadas con el reciclado de hormigón en otros países.

Es fundamental, dar un marco legal a la utilización del hormigón reciclado como agregado de un nuevo hormigón, de acuerdo a las metodologías y materiales utilizados en nuestro país. Esta reglamentación no solo debe tratar al material reciclado y a las características del nuevo hormigón, sino que también debe hacer hincapié en la preselección en origen de los materiales a reciclar y su disposición antes de ser utilizado como agregado de un nuevo hormigón.

4.12 REFERENCIAS

- [1] Oidonomau D., "Recycled Concrete Aggregates.", *Cement and concrete Composites*, 27, 2005, 3154-318
- [2] Di Maio A.A., Gutierrez F., Traversa L.P., "Comportamiento físico Mecánico de Hormigones Elaborados con agregados reciclados.", 14^o Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarría, 2001, 34-44.
- [3] Topcu I.B., "Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete.", *Cement and Concrete Research*, 27, 12, 1997, 1817-1823.
- [4] Giaccio G., Zerbino R., "Mecanismo de rotura en compresión en hormigón reciclado.", *Revista Hormigón*, 41, 2005, 25-38.
- [5] RILEM Recommendation 121 DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, 27, 2004, 557-569
- [6] Hansen T.C., "Recycling of demolished concrete and masonry.", RILEM Report of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Recycling of Concrete). E & FN Spon, London, UK, 1992.
- [7] Kazai Y., "Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan.", Lauritzen E. (Ed.), *Demolition and Reuse of Concrete*. E&FN Spon, London, UK, 1994, 93-104.
- [8] Hendriks C.F., Pietersen H.S., "Sustainable Raw Material, Construction and Demolition Waste.", RILEM Report, 22, 2000.
- [9] Llatas C., "A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list.", *Waste Management*, 31, 6, 2011, 1261-1276.
- [10] Corinaldesi V., Marconi G., "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete.", *Construction and Building Materials*, 23, 8, 2009, 2869-2876.
- [11] Morales, M.M., "El residuo de construcción y demolición (RCD) como árido en la elaboración de prefabricados no estructurales", Tesis doctoral, Universidad de Granada, 2013.
- [12] Symonds Group, "Symonds Group Ltd 46967 Final Report: construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.", 1999.
- [13] Tam V.W.Y., Gao W.F, Tam C.M., "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.", *Cement and Concrete Research*, 35, 6, 1195-1203.
- [14] Instrucción de Hormigón Estructural EHE. 2008.
- [15] RILEM. (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) "Specifications for concrete with recycled aggregates.", *Materials and Structures*, 27, 1994, 557-559.
- [16] Kasai Y., "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan.", *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994, 93-104.
- [17] Kawano H., "The State of Using By-Products in Concrete in Japan and Outline of JIS/TR on Recycled Concrete Using Recycled Aggregate.", Public Works Research Institute. Proceedings of the 1st FIB Congress, 2002.
- [18] Psawa F., Noguchi T., "New Technology for the Recycling of Concrete. Japanese experience.", *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century*, 2000, 274-287.
- [19] DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate", 2000.
- [20] Collins R.J., "BRE Digest 433: Recycled Aggregates". Noviembre 1998.
- [21] "Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392". ISBN 186081 381X.



- [22] WRAP, “Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates.”, 2002.
- [23] BS 8500-2:2006. “Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete”.
- [24] De Oliveira M.J.E., De Assis C.S., De Mattos J.T., “Recycled Aggretate Standarization in Brazil.”, Universidad de Estadual Paulista, Centro Universitario do Instituto Mauá de Tècnología, Universidad de Taubaté, Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. Barcelona, 2004.
- [25] Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’Ile-de-France: Iês bétons ET produits de démolition recycles-LCPC, Paris, 1996.
- [26] ACI 318M, 2002, Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Com-mittee 318. A merican Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
- [27] Alaejos M.P. y otros, “Utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigón estructural.”, Monografías ACHE, 2006.
- [28] Aguado A., “Demolición y reutilización de estructuras de hormigón”. GEHO-CEB, 1997.
- [29] Buyle-Bodin F., Hadjieva-Zaharieva R., “Influence of Industrially Produced Recycled Aggregates on Flow Properties of Concrete.”, Materials and Structures, 35, 2002, 504-509.
- [30] Takenama Corporation, “High-quality Recycled Aggregate “Cyclite” Acquires First Approval of Innovative Building Technologies from Building Center of Japan.”, 1999.
- [31] Katz, A., “Recycling of partially hydrated concrete”. Waste Materials in Construction. Edited by G.R. Woolley; J.J.J.M Goumans; P.J. Wainwright, 2000, 383-391.
- [32] Tobio J.M., “Ensayos no destructivos: métodos aplicables a la construcción.”, Libro de Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1957, 59-112
- [33] Ashford S.A., Visvanathan C., Husain N., Chomsurin C., “Design and construction of engineered municipal solid waste landfills in Thailand.”, Waste Management and Research, 18, 2000, 462–470.
- [34] Padungsirikul P.,” Sustainable solid waste landfill management research and development in Thailand.”, Pollution Control Department of Thailand, 2003.
- [35] Thongkaimook A., “3R Portfolio-good practices to promote the 3R’s. Pollution Control Department of Thailand.”, Ministry of Natural Resources and Environment Thailand, 2005.
- [36] Brodersen J., Juul J., Jacobsen H., “Review of Selected Waste Streams: Sewage Sludge.”, Construction and Demolition Waste, Waste Oils, Waste from Coal-Fired Power Plants and Biodegradable Municipal Waste. European Topic Centre on Waste European Environment Agency, 2002.
- [37] Cochran T., Townsend D., Reinhart H., Heck, “Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida.”, US. Waste Management 27, 2007, 921–931
- [38] Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I., Al-Humoud J., “Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait.”, Waste Management 24, 2004, 1049–1059.
- [39] Poon C.S., “Management and recycling of demolition waste in Hong Kong.”, Waste Management & Research 15, 1997, 561–572.
- [40] Tam Vivian W.Y., Wangb K., Tam C.M., “Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis.”, Journal of Hazardous Materials 152, 2008, 703–714.
- [41] Catálogo de residuos. Gobierno de España, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino. CEDEX, 2010.

CAPÍTULO 5

MEJORAS PROPUESTAS SOBRE EL HORMIGÓN RECICLADO

CAPÍTULO 5

MEJORAS PROPUESTAS SOBRE EL HORMIGÓN RECICLADO

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, el estudio de los agregados reciclados de hormigón, presenta dificultades, pues se trata de un material con propiedades heterogéneas, las cuales dependen, del mortero adherido al agregado grueso del viejo hormigón y de su procedencia. Esto se debe, en el primer caso, al grado de trituración y del manipuleo previo a su utilización; y en el segundo, al tipo y destino de estructura original, calidad de hormigón, elaboración, curado, etc. Estas variables, hacen que la calidad del agregado reciclado a utilizar sea muy aleatoria, lo cual es necesario tener en cuenta al momento de realizar algún análisis.

Estos puntos débiles de los agregados reciclados de hormigón, su alta porosidad, elevada cantidad de microfisuras, posible contenido de cloruros y sulfatos, y otras impurezas y la gran cantidad de mortero de cemento adherido, afectará el rendimiento mecánico del hormigón reciclado [1]. Por ello, para que el agregado reciclado de hormigón pueda ser aplicado como agregado de hormigones de alta calidad es necesario conocer estas limitaciones.

5.2 UTILIZACIÓN DE ADITIVOS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO

5.2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de los trabajos presentados en este capítulo es realizar una evaluación de las propiedades de estos hormigones y analizar los efectos que genera la incorporación de diferentes aditivos a su masa. A tal fin, se estudiaron propiedades mecánicas (resistencia a compresión y tracción indirecta) y físicas relacionadas con la estructura de poros (absorción capilar) de hormigones elaborados con agregado grueso reciclado, producto de la trituración de hormigones, realizados con canto rodado patagónico. Para ello, se moldearon probetas de hormigón con distinta relación agua/cemento y diferentes aditivos: Incorporador de Aire, Superfluidificante e Incorporador de Aire con Superfluidificante. Se analizaron las



propiedades antes mencionadas para determinar las posibilidades y limitaciones de aplicación de las distintas mezclas ensayadas.

5.2.2 TRABAJO EXPERIMENTAL

5.2.2.1 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Se proyectaron hormigones con distintas relaciones agua/cemento: 0,45; 0,50 y 0,60. Para cada una de ellas, se moldearon probetas sin aditivo, denominadas Patrón (P) y con diferentes aditivos como: incorporador de aire (A), superfluidificante (S) e incorporador de aire + superfluidificante (S+A).

En todas las mezclas de hormigón se reemplazó el 75% del agregado natural por agregado reciclado, por este motivo, se los identifica como HR75.

5.2.2.2 MATERIALES Y MEZCLAS

Cemento: Se usó cemento pórtland normal (CPN (40)) proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silícea proveniente de un yacimiento ubicado al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la norma IRAM 1627 [2]. La granulometría se indica en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Granulometría del Agregado Fino

Tamiz N°	4	8	16	30	50	100
% acumulado	5	16	32	59	84	100

Agregados gruesos, se emplearon dos tipos:

a) **Natural:** constituido por canto rodado cuyo tamaño máximo nominal es 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la norma IRAM 1627 [2]. La granulometría se indica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Granulometría del Agregado Grueso Natural

Tamiz (mm)	38	25	19	12,5	9,5	4,5
% acumulado	--	22	47	75	89	100

b) Reciclado: El hormigón a reciclar provino de la rotura de probetas de hormigón elaboradas con canto rodado proveniente del Laboratorio de Estudio y Ensayo de Materiales de la UNS. Para obtener las muestras recicladas, se utilizó una trituradora de mandíbula de laboratorio. Se clasificó al agregado resultante, de tal manera de ajustar la curva granulométrica, a la indicada en la Tabla 5.2. Es decir, se obtuvo una distribución y un tamaño máximo nominal semejante al canto rodado natural.

Se evaluaron algunas propiedades del agregado natural (canto rodado) y del agregado reciclado (hormigón triturado) como: densidad relativa, en condición saturada y superficie seca (sss), absorción de agua en 24 horas (IRAM 1562) [3] y desgaste “Los Ángeles” (graduación “A” según la granulometría obtenida, IRAM 1532) [4]. En la Tabla 5.3 se detallan las características estudiadas del agregado grueso natural y del reciclado.

Tabla 5.3: Características de los Agregados

Agregado	Densidad sss (kg/dm³)	Absorción (%)	Desgaste Los Ángeles (%)
Canto Rodado	2,66	0,4	16
Reciclado	2,39	4,7	30

Con el fin de analizar el comportamiento del hormigón reciclado elaborado con la incorporación de distintos aditivos, se realizaron diferentes mezclas, cuyas dosificaciones están detalladas en las Tablas 5.4 a 5.6. Los hormigones se proyectaron teniendo en cuenta que cumplieran con un ámbito de consistencia de 8-10 cm, medida con el Cono de Abrams (IRAM 1536) [5]. Todas las muestras presentaron un grado de trabajabilidad aceptable, sin indicios de segregación ni exudación. Se midió el porcentaje de aire (IRAM 1602) [6] en todos los hormigones que tenían aditivo incorporador de aire (A y S+A).

Los hormigones elaborados con agregados gruesos reciclados secos y arena natural demandan, para obtener una misma trabajabilidad, aproximadamente un 5% más de agua que los hormigones convencionales, debido a su mayor capacidad de absorción [7,8].

Tabla 5.4: Proporciones de la serie de mezclas con $a/c=0,45$

Mezcla HR75	P	S	A	S+A
Cemento (kg/m^3)	390	367	390	367
Agua (l)	175	165	175	165
Canto Rodado (kg/m^3)	263	263	263	263
Agr. Reciclado (kg/m^3)	699	699	699	699
Porcentaje aire medido (%)	---	---	4,0	4,0

Tabla 5.5: Proporciones de la serie de mezclas con $a/c=0,50$

Mezcla HR75	P	S	A	S+A
Cemento (kg/m^3)	350	320	350	320
Agua (l)	175	160	175	160
Canto Rodado (kg/m^3)	263	263	263	263
Agr. Reciclado (kg/m^3)	699	699	699	699
Porcentaje aire medido (%)	---	---	4,1	4,5

Tabla 5.6: Proporciones de la serie de mezclas con $a/c=0,60$

Mezcla HR75	P	S	A	S+A
Cemento (kg/m^3)	290	275	290	275
Agua (l)	175	165	175	165
Canto Rodado (kg/m^3)	263	263	263	263
Agr. Reciclado (kg/m^3)	699	699	699	699
Porcentaje aire medido (%)	---	---	5,0	5,5

Se hicieron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para realizar ensayos físicos de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) [9] y mecánicos: resistencia a compresión (IRAM 1546) [10] y tracción indirecta (IRAM 1658) [11]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [12].

5.2.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 5.7 se pueden apreciar los resultados obtenidos sobre la caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón (resistencia a compresión y tracción indirecta). Los valores de resistencia tabulados corresponden al promedio de tres determinaciones realizadas con probetas semejantes. Los resultados de las propiedades vinculadas con la estructura de

poros (capacidad y velocidad de succión capilar) de las muestras con incorporación de aditivos, se detallan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7: Características del hormigón empleado en las probetas ensayadas. Resistencia a compresión y tracción indirecta.

HR75	Relación a/c	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]
P A S S + A	0,45	36,3	3,2
		33,6	3,6
		38,9	2,7
		36,7	3,2
P A S S + A	0,50	34,1	2,7
		31,5	2,9
		35,2	3,2
		34,3	3,4
P A S S + A	0,60	33,1	2,5
		22,2	2,4
		34,5	3,4
		33,3	2,3

Tabla 5.8: Capacidad y velocidad de succión capilar.

HR75	Relación a/c	Capacidad de Succión Capilar [g/m ²]	[% respecto al patrón]	Velocidad de Succión Capilar [g/m ² s ^{1/2}]	[% respecto al patrón]
P A S S + A	0,45	7.009	100	11,8	100
		6.782	97	9,8	83
		6.839	98	11,3	96
		6.494	93	10,3	87
P A S S + A	0,50	7.069	100	12,0	100
		5.517	78	10,4	87
		5.862	83	10,0	83
		5.115	72	7,8	65
P A S S + A	0,60	8.046	100	17,3	100
		6.667	83	11,6	67
		6.724	84	11,0	64
		5.920	74	9,5	55

5.2.4 DISCUSIÓN

En la Tabla 5.3 se observa que la densidad del agregado reciclado resultó ser un 10 % menor, respecto a la del canto rodado, mientras que la absorción fue muy superior a la del agregado natural. Ambas diferencias se deben a que el hormigón triturado tiene un porcentaje de mortero adherido, de menor densidad y con mayor absorción que el canto rodado original, e inclusive puede estar constituido por mortero únicamente.

El desgaste por abrasión (ensayo “Los Ángeles”) obtenido para los agregados reciclados fue aproximadamente el doble, respecto al de los agregados naturales. Aun así, ambos resultados de pérdida se mantienen por debajo del límite indicado como máximo en el Reglamento CIRSOC-201, 6.3.1.2.3 c) [13]. Este importante aumento en la pérdida por desgaste se atribuye al elevado porcentaje de mortero y/o pasta adherido al agregado natural, como así también a la presencia de partículas compuestas únicamente de mortero.

Como era de esperar, en las Tablas 5.7 y 5.8 se aprecia que los hormigones elaborados con menor relación agua/cemento tienen mayor resistencia y menor absorción.

En todas las mezclas, tanto la capacidad como la velocidad de succión capilar, son elevadas respecto a las de hormigones elaborados en forma convencional. Esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad.

Para todas las relaciones agua/cemento estudiadas, las muestras con incorporación de aditivos presentaron una disminución en los valores de capacidad y velocidad de succión capilar respecto a las muestras patrón, siendo la más efectiva la combinación de superfluidificante más incorporador de aire (S+A). Esta disminución fue más significativa en los hormigones de mayor relación agua/cemento.

El uso de incorporador de aire resultó más beneficioso, desde el punto de vista de la absorción capilar, en los hormigones de relación agua/cemento de 0,60, pero generó una importante disminución de la resistencia a compresión (33 %). Para los hormigones con relación agua/cemento de 0,45, la disminución de la absorción capilar y de la resistencia a compresión fueron de un 3 % y un 7 %, respectivamente, y para aquellos con relación agua/cemento de



0,50, la disminución de la absorción capilar y de la resistencia a compresión fueron de un 22 % y un 8 %, respectivamente.

Por su parte, los hormigones con la incorporación del superfluidificante, además de mostrar mejor trabajabilidad y no incorporar aire, tuvieron un leve aumento de la resistencia mecánica. Este aumento fue de un 7 %, para los hormigones elaborados con una relación agua/cemento de 0,45, de un 3 % para aquellos con relación agua/cemento de 0,50 y de un 4 %, para los hormigones con mayor relación agua/cemento.

La incorporación simultánea de estos dos aditivos, además de disminuir la absorción capilar, hizo que la resistencia mecánica sea, en términos generales, similar al hormigón patrón, al que no se le habían incorporado aditivos.

5.3 TRATAMIENTOS PREVIOS SOBRE EL AGREGADO RECICLADO

La presencia de mortero adherido genera una elevada absorción capilar de los agregados gruesos reciclados. Esto, entre otras cosas, implica una menor calidad del hormigón que utiliza al mismo en su elaboración. Por este motivo, en esta etapa de la investigación, se analizan distintas variantes para la elaboración de hormigón reciclado, para lo cual se emplearon diferentes tratamientos sobre el agregado reciclado de hormigón, con el fin de disminuir su absorción capilar y mejorar la calidad del hormigón resultante.

Estas variantes de tratamientos sobre los agregados reciclados se plantearon de dos formas diferentes, una de ellas haciéndolo en forma previa al mezclado de los materiales en la elaboración del hormigón, y la otra en forma simultánea al mezclado, con variaciones en el orden de mezclado de materiales.

5.3.1 TRATAMIENTOS PREVIOS NO SIMULTÁNEOS AL MEZCLADO

5.3.1.1 INTRODUCCIÓN

Se estudiaron las propiedades mecánicas y la absorción capilar de mezclas elaboradas con agregado grueso reciclado, producto de la trituración de hormigones sometidos a distintos

tratamientos. Además, se realizaron ensayos no destructivos (Resistividad), sobre las diferentes muestras.

En este estudio, se moldearon probetas de hormigón con una relación agua/cemento de 0,50 y con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por hormigón triturado; el mismo fue sometido a distintos tratamientos previos a su utilización como agregado. Se empleó para ello, lechada de cemento y dos productos impermeabilizantes de distinta procedencia.

5.3.1.2 MATERIALES Y MEZCLAS

Se realizaron cinco hormigones de relación agua/cemento 0,50, de los cuales, uno se efectuó sin la utilización de agregado reciclado (usado como patrón), y los cuatro restantes, con un porcentaje de reemplazo del 50 %, en volumen, del agregado grueso natural (canto rodado) por agregado reciclado. En tres de estos casos, el agregado reciclado fue sometido a un tratamiento previo con: una lechada de cemento y dos soluciones con la incorporación de productos impermeabilizantes de distinta procedencia y de uso comercial, a los que se denominaron como producto A y producto B, sin hacer mención a la marca comercial.

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40), proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceo proveniente de un yacimiento ubicado en la zona rural del partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [2].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado cuyo Tamaño Máximo Nominal de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [2], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.
- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de elementos de hormigón elaborados con canto rodado, provenientes de distintas obras realizadas en la zona. Se

molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.

- c) Reciclado con tratamiento previo: el material mencionado en el inciso b) fue sometido a tres tratamientos diferentes: una lechada de cemento y dos soluciones con la incorporación de productos impermeabilizantes de distinta procedencia y de uso comercial en nuestro país.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de los diferentes hormigones proyectados, se los denominó como se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Denominación hormigones proyectados

Denominación	Características
P	100% Agregado grueso natural
R	50% Agregado grueso reciclado sin tratamiento previo
L	50% Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: Lechada de Cemento
A	50% Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: Producto A
B	50% Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: Producto B

Las dosificaciones de los hormigones proyectados están detalladas en la Tabla 5.10, diferenciándose la correspondiente al hormigón patrón sin agregado reciclado (P), de la utilizada para los casos en que se reemplazó un 50 % de agregado natural por agregado reciclado, ya sea con o sin tratamiento previo (50 % A.R.).

Tabla 5.10: Proporciones de la serie de mezclas realizadas con a/c = 0,50

Mezcla	P	50% A.R.
Cemento (kg/m ³ H°)	350	350
Canto Rodado (kg/m ³ H°)	930	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)	0	443
Agr. Fino (kg/m ³ H°)	895	895

Los hormigones se diseñaron teniendo en cuenta que cumplieran con un rango de consistencia de 8-10 cm, medida con el Cono de Abrams (IRAM 1536) [5]. Todas las muestras

presentaron un grado de trabajabilidad aceptable, sin observarse indicios de segregación ni exudación.

5.3.1.3 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Probetas

Se elaboraron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para realizar ensayos físicos de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) [9] y mecánicos: resistencia a compresión (IRAM 1546) [10] y tracción indirecta (IRAM 1658) [11]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [12].

Tratamientos previos

En todos los tratamientos realizados sobre el hormigón reciclado, se efectuó el siguiente procedimiento:

- a) Incorporación del agregado reciclado en la hormigonera;
- b) Incorporación del cemento o producto impermeabilizante;
- c) Mezclado de los materiales;
- d) Incorporación del agua;
- e) Mezclado durante 5 minutos;
- f) Volcado del material tratado;
- g) Dispersión del material para evitar el aglomerado de pasta y agregado; y
- h) Movimiento del material tratado, 2 veces por día durante 2 o 3 días, hasta notar que esté la superficie seca.

En la Figura 5.1 se muestra, esquemáticamente, el procedimiento utilizado para los diferentes tratamientos previos, poniendo como referencia, al hormigón reciclado sin tratamiento previo (R). El aspecto presentado por el agregado reciclado con y sin tratamiento previo, puede apreciarse en la Figura 5.2.

Cabe acotar que en el Apéndice B se muestran algunas fotografías y estudios complementarios referidos a los hormigones elaborados en este capítulo.

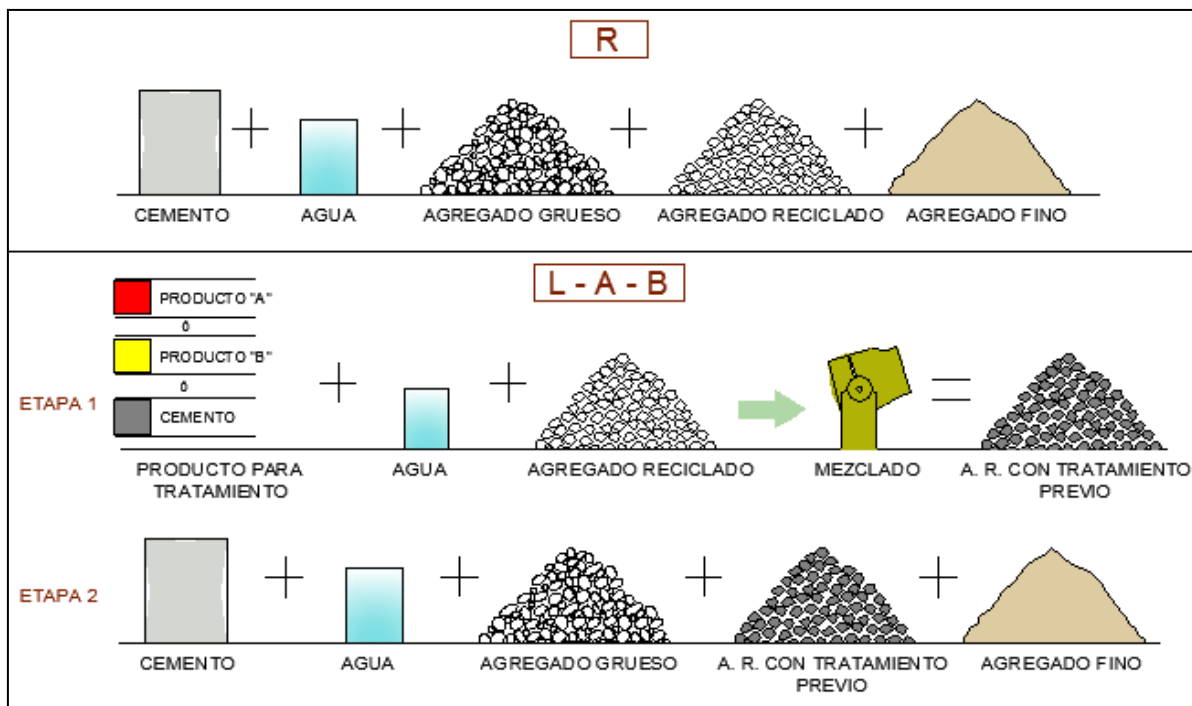


Figura 5.1: Esquema de los tratamientos previos realizados



Figura 5.2: Vistas del agregado de hormigón reciclado antes y después del tratamiento previo

5.3.1.4 ENSAYO DE RESISTIVIDAD

La resistividad eléctrica (ρ en unidades de Ωm), inversa de la conductividad, se trata de una medida volumétrica de la resistividad eléctrica (R_e en unidad de Ω), que mediante la ley de Ohm se expresa como la relación entre el voltaje y la corriente aplicada ($R_e=V/I$). Ha sido desarrollada inicialmente en el campo de la geofísica [14] y es una propiedad que refleja la capacidad del medio poroso para el transporte de cargas eléctricas en un volumen finito o semi-infinito.

La resistividad eléctrica es una propiedad del hormigón que permite su control de una forma no destructiva y por ello, accesible al autocontrol. Los valores de resistividad son indicadores del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del hormigón y por ello, del grado de curado y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el hormigón [15].

Para la determinación de la resistividad eléctrica (ρ) se utilizó el método de las cuatro puntas (Wenner), descrito y estandarizado en la Norma UNE 83988-2 [17]. El procedimiento consiste en la utilización de cuatro electrodos en contacto con la superficie del material, distanciados en 5 cm, mediante los cuales se aplica una corriente y se mide la diferencia de potencial generada. El contacto eléctrico entre los electrodos y el hormigón se garantiza mediante el agua presente en un material humedecido y ubicado en las puntas de contacto. Se aplica una corriente entre dos electrodos situados en los extremos del eje, y la medida de la diferencia de potencial en otros dos situados entre y alineados a los anteriores. Se realizan 6 medidas sobre generatrices separadas 60° entre sí, alrededor de la muestra, para medir a lo largo de todo el perímetro de forma homogéneamente espaciada. El valor de la resistencia eléctrica de cada probeta se obtiene como el promedio de estas 6 medidas.

Para el cálculo de la resistividad eléctrica se utilizan las siguientes expresiones:

$$\rho = k \cdot R_e \quad (5.1)$$

$$k = 2 \cdot \pi \cdot a \quad (5.2)$$

$$R_e = \frac{V}{I} \quad (5.3)$$

donde:

ρ es la resistividad eléctrica del hormigón medida en Ωm .

k es la constante de celda, en m.

R_e es la resistencia eléctrica del hormigón, en Ω .

I es la intensidad eléctrica que circula por el circuito, en mA.

V es la diferencia de potencial entre los electrodos centrales, en V.

a es la distancia entre electrodos (50 mm).

Teniendo en cuenta el método de medida directo, descrito en la Norma UNE 83988-1 [16], (que es la referencia en la determinación de este parámetro eléctrico ρ), se incorpora al cálculo del valor de la resistividad obtenido por el método de las 4 puntas, un factor originado de la calibración de este método frente al directo. El factor citado se denomina constante de forma (χ), y varía según las dimensiones de la probeta de hormigón ensayada. Para el caso de la probeta cilíndrica utilizada, diámetro (D) 15 cm y longitud (L) 30 cm, se obtiene χ igual a 1,65 [18].

Por lo tanto, para el caso de la resistividad medida por el método de las 4 puntas, se calcula la constante de celda a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{exp}}}{\chi} \quad (5.4)$$

donde:

ρ_{exp} es la resistividad medida experimentalmente, medida por el método de las cuatro puntas

χ es una constante de forma, cuyo valor es 1,65.

5.3.1.5 RESULTADOS

En la Tabla 5.11 se puede apreciar un detalle de los resultados obtenidos en los ensayos, tendientes a la caracterización de las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados y en la Tabla 5.12 se muestra una comparación porcentual de los valores que se determinaron en el ensayo de absorción capilar, tomando como referencia los valores obtenidos para el hormigón reciclado sin tratamientos previos.

Tabla 5.11: Características mecánicas de los hormigones empleados

PROBETA	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]
P	36,4	3,6
R	32,6	3,0
L	36,0	3,5
A	34,5	3,4
B	25,5	2,7

Tabla 5.12: Capacidad (C) y velocidad de succión capilar (V) de los distintos hormigones elaborados

PROBETA	C [g/m ²]	C [%]	V [g/m ² s ^{1/2}]	V [%]
R	7.069	100	14,8	100
P	4.023	57	7,9	53
L	4.241	60	7,2	49
A	4.736	67	7,8	53
B	6.079	86	13,0	88

En la Tabla 5.13 se muestran los valores obtenidos del ensayo de Resistividad Eléctrica y una comparación porcentual de los mismos, tomando como referencia, los valores obtenidos para el hormigón patrón, sin agregado reciclado (P).

Tabla 5.13: Resistividad Eléctrica (ρ) de los distintos hormigones elaborados

PROBETA	ρ [Ω .m]	ρ [%]
P	62	100
R	35	56
L	56	91
A	48	77
B	46	74

5.3.1.6 DISCUSIÓN

Los resultados de resistencia a compresión del hormigón indican que al reemplazar un 50 % del agregado natural por agregado reciclado, se obtiene un material de buena prestación, como para ser utilizado en estructuras resistentes. Sin embargo, los valores de absorción capilar son elevados respecto a los hormigones elaborados en forma convencional, y los de resistividad claramente inferiores, esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad.

Los hormigones elaborados con agregado grueso reciclado, al que se le aplicó previamente un tratamiento de lechada de cemento o del producto A, mostraron similar comportamiento mecánico y de succión capilar que el hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregados reciclados (P). Por otro lado, aquellos elaborados con agregado reciclado sin tratamiento previo y con el tratamiento de producto B, mostraron valores inferiores de resistencia mecánica (Tabla 5.11) y los más elevados de absorción capilar (Tabla 5.12).

En la Tabla 5.13, se observa una disminución de casi un 50 % del valor de resistividad, entre un hormigón patrón (P) y el hormigón elaborado con agregado reciclado sin tratamientos previos (R). Por otro lado, los hormigones reciclados cuyos agregados fueron sometidos a tratamientos previos, tuvieron una mejoría en sus valores de resistividad, siendo el más eficiente, el tratamiento previo realizado con una lechada de cemento, alcanzando un 91% del valor obtenido en el hormigón patrón (P).

5.3.2 VARIANTES DEL TRATAMIENTO PREVIO CON LECHADA DE CEMENTO

5.3.2.1 INTRODUCCIÓN

Como se observó en el punto anterior, la realización de tratamientos previos sobre los agregados reciclados de hormigón, es una opción para mejorar las propiedades de los hormigones que utilizan los mismos en su elaboración.

En este punto, se presentan distintas propuestas para la elaboración de hormigón reciclado, para lo cual se emplearon tratamientos con lechada de cemento sobre el agregado reciclado de hormigón, con diferentes variantes, con el fin de disminuir la absorción capilar del hormigón

resultante. Además, se analizan las posibilidades de aplicación de dichos tratamientos, para lo cual se determinaron sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión y tracción indirecta) y físicas relacionadas con la estructura de poros (absorción capilar) en las diferentes muestras.

Se elaboraron hormigones reciclados con una relación agua/cemento de 0,50 y con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por hormigón triturado, el cual, previo al hormigonado fue sometido a un tratamiento de lechada de cemento. En dicho tratamiento se estudiaron dos variables:

- a) La relación agua / cemento de la lechada
- b) La cantidad de días transcurridos entre la fecha de realización del tratamiento y la de hormigonado de las probetas.

Los resultados mostraron la influencia de las variables aplicadas al tratamiento previo, sobre las propiedades de los hormigones obtenidos. Se comparó su comportamiento con el de hormigones elaborados sin agregados reciclados y con agregados grueso reciclado sin tratamiento previo.

5.3.2.2 MATERIALES Y MEZCLAS

Se elaboraron hormigones con relación agua / cemento de 0,50, de los cuales, uno se realizó sin la utilización de agregado reciclado, y los restantes, con un reemplazo, en volumen, de agregado grueso natural (canto rodado) por agregado reciclado del 50%. Además, se elaboraron hormigones en los que el agregado reciclado fue sometido a tratamientos previos con lechada de cemento, en los cuales se estudiaron dos variables:

- a) La relación agua / cemento de la lechada; y
- b) La cantidad de días transcurridos entre la fecha de realización del tratamiento y la de hormigonado de las probetas, los cuales se estipularon en 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días.

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40) proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceas proveniente de un yacimiento ubicado en la zona rural del Partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [2].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado cuyo Tamaño Máximo Nominal es de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [2], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.
- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de probetas de hormigón elaborados con canto rodado, provenientes de distintas obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.
- c) Reciclado con tratamiento previo: el material mencionado en el inciso b) fue sometido a tres tratamientos diferentes, realizados con lechada de cemento, cuyas relaciones agua/cemento fueron: $a/c = 0,50$, $a/c = 0,74$ y $a/c = 1,00$.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de los diferentes hormigones proyectados, se los denominó como se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Denominación hormigones proyectados

Denominación	Características
P	100 % Agregado grueso natural (Patrón)
R	50 % Agregado grueso reciclado sin tratamiento previo
TP1*	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: $a/c = 0,50$
TP2*	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: $a/c = 0,74$
TP3*	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo: $a/c = 1,00$

*Para poder diferenciar los hormigones, de acuerdo a la cantidad de días transcurridos entre la realización del tratamiento previo sobre el agregado grueso reciclado y el día de hormigonado, a la denominación se le incorporó un subíndice indicativo de la cantidad de días antes mencionada. Por ejemplo, se indicó TP1₂₁ a aquellos hormigones en los que se utilizó agregado grueso reciclado con tratamiento previo TP1, elaborados luego de 21 días de la realización del mismo.

En la Tabla 5.15 se detallan las características estudiadas del agregado fino y grueso natural y del agregado grueso reciclado, con y sin tratamientos previos.

Tabla 5.15: Características de los agregados

Agregado	Densidad sss (kg/dm³)	Absorción (%)
Arena natural silíceas	2,58	1,2
Canto Rodado	2,66	0,4
Agr. Reciclado sin TP	2,43	6,4
Agr. Reciclado con TP1	2,39	5,8
Agr. Reciclado con TP2	2,40	5,6
Agr. Reciclado con TP3	2,46	5,6

Las dosificaciones de los hormigones proyectados están detalladas en la Tabla 5.16, diferenciándose la correspondiente al hormigón patrón sin agregado reciclado (P), de la utilizada para los casos en que se reemplazó 50 % de agregado natural por agregado reciclado, ya sea con o sin tratamiento previo (50 % A.R.).

Tabla 5.16: Proporciones de la serie de mezclas realizadas con a/c = 0,50

Mezcla	P	50% A.R.
Cemento (kg/m ³ H°)	350	350
Canto Rodado (kg/m ³ H°)	930	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)	0	443
Agr. Fino (kg/m ³ H°)	895	895

Los hormigones elaborados con agregados gruesos reciclados secos y arena natural demandan, para obtener una misma trabajabilidad, aproximadamente un 5 % más de agua que los hormigones convencionales, debido a su mayor capacidad de absorción [7,8]. Se utilizaron por m³ de hormigón: 175 litros de agua para mezclado y 8 litros para humedecer previamente el agregado reciclado seco.

Los hormigones se diseñaron teniendo en cuenta que cumplieran con un rango de consistencia de 8-10 cm, medida con el Cono de Abrams [5]. Todas las muestras presentaron un grado de trabajabilidad aceptable, sin observarse indicios de segregación ni exudación.

5.3.2.3 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Probetas

Se moldearon probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para realizar ensayos físicos de: capacidad y velocidad de succión capilar [9] y mecánicos de: resistencia a compresión [10] y tracción indirecta [11]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país [12].

Tratamientos previos

En todos los tratamientos realizados sobre el hormigón reciclado, se efectuó el procedimiento indicado en el punto 5.3.1.3.

5.3.2.4 RESULTADOS

En la Tabla 5.17 se detallan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados. Los valores expuestos, son el promedio de tres determinaciones con una dispersión entre resultados menor al 15 % del promedio [19].

En las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se observa la evolución del ensayo de absorción capilar, correspondiente a cada tratamiento previo realizado. Cada figura muestra las curvas correspondientes a cada intervalo de tiempo transcurrido entre el día de realización del tratamiento y el día de hormigonado. Además en los tres gráficos se muestra el comportamiento, ante el mismo ensayo, del hormigón tradicional, sin agregado reciclado (P), y del hormigón reciclado sin tratamiento previo (R).

Tabla 5.17: Características mecánicas de los hormigones empleados.

HORMIGONES		Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]
P		36,4	3,6
R		32,6	3,0
TP1	TP1₁	33,1	3,1
	TP1₃	31,7	2,9
	TP1₇	31,1	2,7
	TP1₁₄	30,6	2,8
	TP1₂₁	32,5	3,1
	TP1₂₈	30,9	3,2
TP2	TP2₁	32,8	2,8
	TP2₃	35,1	2,9
	TP2₇	29,2	2,8
	TP2₁₄	29,1	2,9
	TP2₂₁	35,8	2,5
	TP2₂₈	30,6	2,8
TP3	TP3₁	34,4	3,0
	TP3₃	27,2	2,9
	TP3₇	31,7	3,4
	TP3₁₄	29,7	3,0
	TP3₂₁	30,3	3,2
	TP3₂₈	32,8	2,8

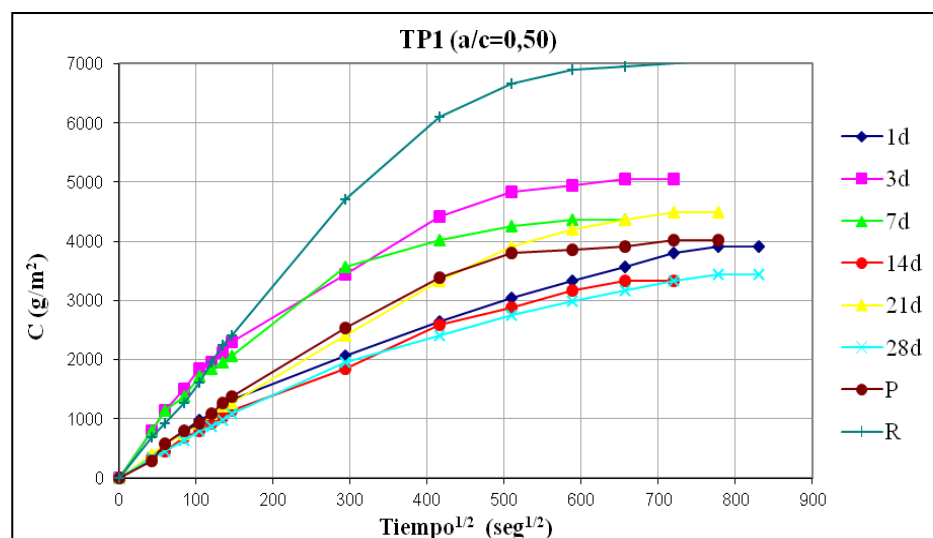


Figura 5.3: Ensayo de absorción capilar (TP1).

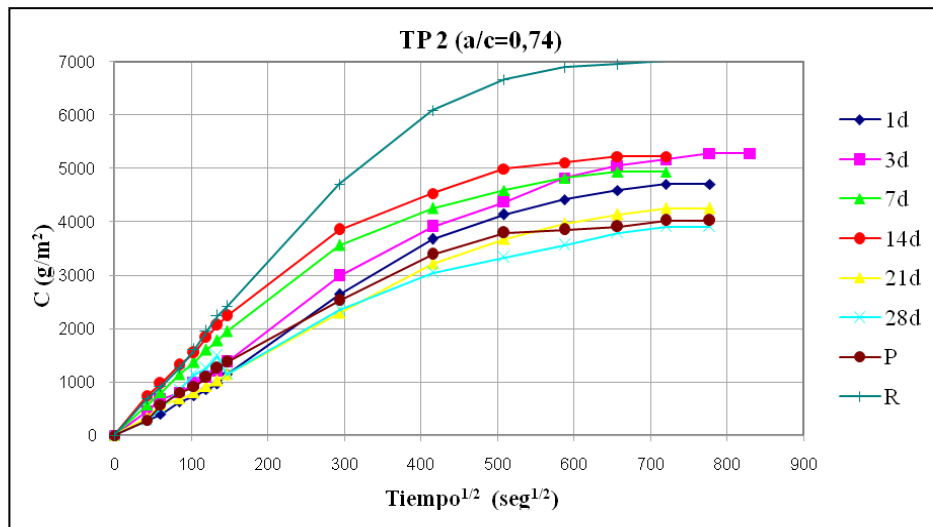


Figura 5.4: Ensayo de absorción capilar (TP2).

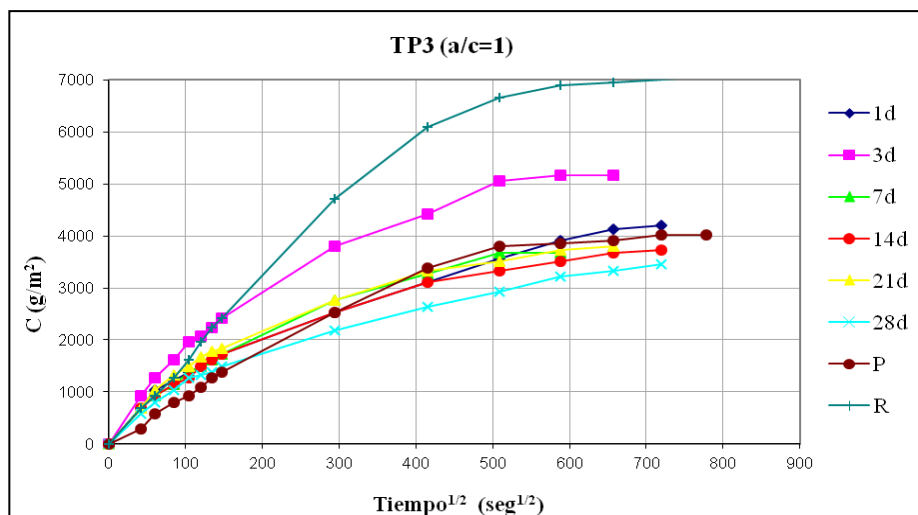


Figura 5.5: Ensayo de absorción capilar (TP3).

En la Tabla 5.18 se muestran los valores de Capacidad de Succión Capilar (C) y de Velocidad de Succión Capilar (V), que se determinaron en el ensayo de absorción capilar de todos los hormigones elaborados.

Tabla 5.18: Características físicas de los hormigones empleados.

	C (g/m ²)			V (g/m ² s ^{1/2})		
	TP1 a/c = 0,50	TP2 a/c = 0,74	TP3 a/c = 1,00	TP1 a/c = 0,50	TP2 a/c = 0,74	TP3 a/c = 1,00
1d	3.908	4.713	4.195	5,1	8,8	5,8
3d	5.057	5.287	5.172	9,2	8,9	9,2
7d	4.368	4.943	3.678	10,6	10,1	6,9
14d	3.333	5.230	3.736	5,4	10,4	5,6
21d	4.483	4.253	3.793	7,5	7,3	6,6
28d	3.448	3.908	3.448	4,9	6,7	4,8
P	4.023	4.023	4.023	7,9	7,9	7,9
R	7.069	7.069	7.069	14,8	14,8	14,8

5.3.2.5 DISCUSIÓN

Como se mencionó en los puntos anteriores, los resultados de resistencia a compresión del hormigón (Tabla 5.17) indican que al reemplazar un 50 % del agregado natural por agregado reciclado, se obtiene un material de buena prestación, como para ser utilizado en estructuras resistentes. Esto se pudo observar para todos los casos, es decir, con o sin tratamientos previos sobre el agregado reciclado, y en cualquier intervalo de tiempo entre el día de tratamiento y el de hormigonado.

También se aprecia, al igual que en los puntos anteriores, que los valores de Capacidad de Succión Capilar (Tabla 5.18) de los hormigones elaborados con agregados gruesos reciclados, a los que no se les realizaron tratamientos previos son claramente elevados, respecto a los hormigones realizados en forma convencional, esto se debe al hecho que los agregados provenientes de la trituración de hormigón triturado poseen una mayor porosidad.

Los hormigones elaborados con agregado grueso reciclado, al que se le aplicó previamente un tratamiento de lechada de cemento, lograron una clara mejoría respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, mostrando, en casi todos los casos, un comportamiento similar de succión capilar, al hormigón patrón realizado sin la utilización de agregados reciclados (P).

No se puede apreciar una tendencia, en los valores de resistencia a compresión y de Capacidad de Succión Capilar de los hormigones realizados, respecto a los días de secado del

agregado luego del tratamiento. Si bien los valores de absorción obtenidos el día 28 de secado, fueron los menores en casi todos los casos, en el TP1 los valores obtenidos para 1 día de secado fueron muy similares a estos últimos. Tampoco se apreciaron grandes diferencias respecto a la variación de la relación a/c de cada lechada, aplicada en los tratamientos previos.

5.3.3 TRATAMIENTOS PREVIOS SIMULTÁNEOS AL MEZCLADO

5.3.3.1 INTRODUCCIÓN

Como se mostró previamente, la realización de tratamientos previos a los agregados gruesos reciclados de hormigón, es una buena opción para disminuir su permeabilidad, sin embargo, su aplicación es difícil de lograr por cuestiones económicas y de infraestructura. Por este motivo, se estudiaron diferentes alternativas para realizar el tratamiento previo con una lechada de cemento y la mezcla de los componentes del hormigón, en forma simultánea, realizando variaciones en el orden de ingreso de los materiales a la hormigonera.

Estas variantes se basan en la realización de dos etapas de mezclado, en la primera de ellas, se coloca el agregado reciclado con un porcentaje del cemento y del agua de la dosificación, para luego, en una segunda etapa, continuar el mezclado con los demás agregados (arena y agregado grueso natural), agua y cemento restantes. Se estudiaron las propiedades mecánicas y físicas de hormigones elaborados con una relación agua / cemento de 0,50 y con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por hormigón triturado, en los cuales se plantearon cuatro alternativas diferentes de mezclado, variando el porcentaje de cemento utilizado en la primer etapa, que cubre superficialmente al agregado reciclado y la relación agua/cemento de la misma.

Se analizan las posibilidades de aplicación de dichas variantes, para lo cual se determinaron, sobre las diferentes muestras, propiedades mecánicas (resistencia a compresión y tracción indirecta) y físicas relacionadas con la estructura de poros (capacidad y velocidad de succión capilar), además, se realizó un ensayo no destructivo de resistividad eléctrica.

Los resultados mostraron la influencia del orden de mezclado sobre las propiedades de los hormigones obtenidos. Se comparó su comportamiento con el de hormigones elaborados sin agregados reciclados y con agregado grueso reciclado sin tratamiento previo.

5.3.3.2 MATERIALES Y MEZCLAS

Se dosificaron siete hormigones con relación agua / cemento de 0,50, de los cuales, uno se realizó sin la utilización de agregado reciclado (P), y los seis restantes, con un 50 % de reemplazo, en volumen, de agregado grueso natural (canto rodado) por agregado reciclado. En cinco de estos casos, el agregado reciclado fue sometido a tratamientos previos con lechada de cemento.

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40) proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceo proveniente de un yacimiento ubicado en la zona rural del partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [2].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado cuyo Tamaño Máximo Nominal de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [2], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.
- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de elementos de hormigón elaborado con canto rodado, proveniente de distintas obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.
- c) Reciclado con tratamiento previo: el material mencionado en el inciso b) fue sometido a cinco tratamientos distintos con lechada de cemento. Uno de ellos, en forma simultánea al mezclado de materiales (L) y los cuatro restantes en forma simultánea al mezclado, con distintas variantes (L1 a L4), que se describen en el ítem 5.3.3.3.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de los diferentes hormigones proyectados, se los denominó como se muestra en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Denominación hormigones proyectados

Denominación	Características
P	100 % Agregado grueso natural
R	50 % Agregado grueso reciclado sin tratamiento previo
L	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo no simultáneo
L1	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo (Variante 1)
L2	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo (Variante 2)
L3	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo (Variante 3)
L4	50 % Agregado grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo (Variante 4)

Las dosificaciones de los hormigones de referencia mencionados anteriormente (P, R y L) están detalladas en la Tabla 5.20 y corresponden a lo indicado en la Tabla 5.19.

Tabla 5.20: Proporciones de la serie de mezclas realizadas con $a/c = 0,50$

Mezcla	P	R	L
Cemento ($\text{kg/m}^3 \text{H}^\circ$)	350	350	350
Canto Rodado ($\text{kg/m}^3 \text{H}^\circ$)	930	465	465
Agr. Reciclado ($\text{kg/m}^3 \text{H}^\circ$)	0	443	443
Agr. Fino ($\text{kg/m}^3 \text{H}^\circ$)	895	895	895

Los hormigones se diseñaron con un rango de consistencia de 8-10 cm, medida con el Cono de Abrams (IRAM 1536) [5]. Todas las muestras presentaron un grado de trabajabilidad aceptable, sin observarse indicios de segregación ni exudación.

La carga de la hormigonera donde se elaboraron las mezclas L1, L2, L3 y L4, se realizó en dos etapas, las dosificaciones en cada etapa se detallan en las Tabla 5.21.

Tabla 5.21: Etapas de mezclado en los tratamientos previos

Mezcla	Relación a/c lechada	Etapa	
		Primera	Segunda
L1			
Agua (l/m ³ H°)	0,50	43,8	131,2
Cemento (kg/m ³ H°)		87,6	262,4
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		443	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
L2		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	0,50	87,5	87,5
Cemento (kg/m ³ H°)		175	175
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		443	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
L3		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	1,00	43,8	131,2
Cemento (kg/m ³ H°)		43,8	306,2
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		443	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
L4		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	1,00	87,5	131,2
Cemento (kg/m ³ H°)		87,5	262,5
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		443	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895

5.3.3.3 TRATAMIENTOS PREVIOS

En la Figura 5.6 se muestra, esquemáticamente, el procedimiento utilizado para los diferentes tratamientos previos, poniendo como referencia, al hormigón reciclado sin tratamiento previo (R).

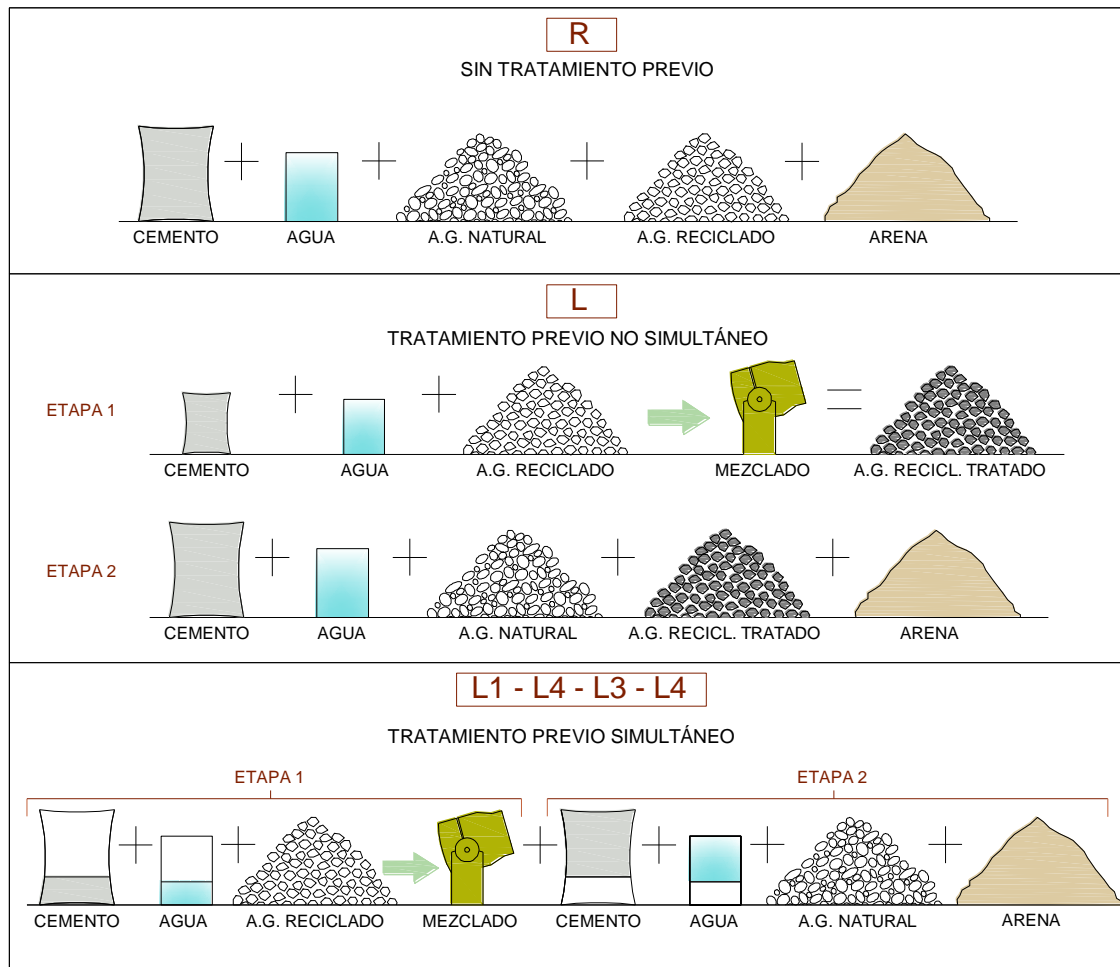


Figura 5.6: Esquema de tratamiento previo simultáneo y no simultáneo

5.3.3.4 ELABORACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS

Se hicieron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm para realizar los ensayos físicos de Capacidad y Velocidad de Succión Capilar (IRAM 1871) [9] y mecánicos: Resistencia a Compresión (IRAM 1546) [10] y Tracción Indirecta o Tracción Simple por Compresión Diametral (IRAM 1658) [11]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [12].

Para la determinación de la Resistividad Eléctrica (ρ) se utilizó el método de las cuatro puntas (Wenner), descrito en la Norma UNE 83988-2 [17]. Los valores obtenidos en este ensayo no destructivo están relacionados, entre otras cosas, con la resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el hormigón [15].

5.3.3.5 RESULTADOS

En la Tabla 5.22 se puede apreciar un detalle de los resultados obtenidos en los ensayos para la caracterización de las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados.

Tabla 5.22: Características mecánicas de los hormigones empleados

PROBETA	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]
P	36,4	3,6
R	32,6	3,0
L	36,0	3,5
L1	36,0	3,0
L2	34,7	3,1
L3	34,4	3,5
L4	35,2	3,2

En la Figura 5.7 se presentan las curvas de absorción capilar (C) en función de la raíz cuadrada del tiempo, para todos los hormigones proyectados.

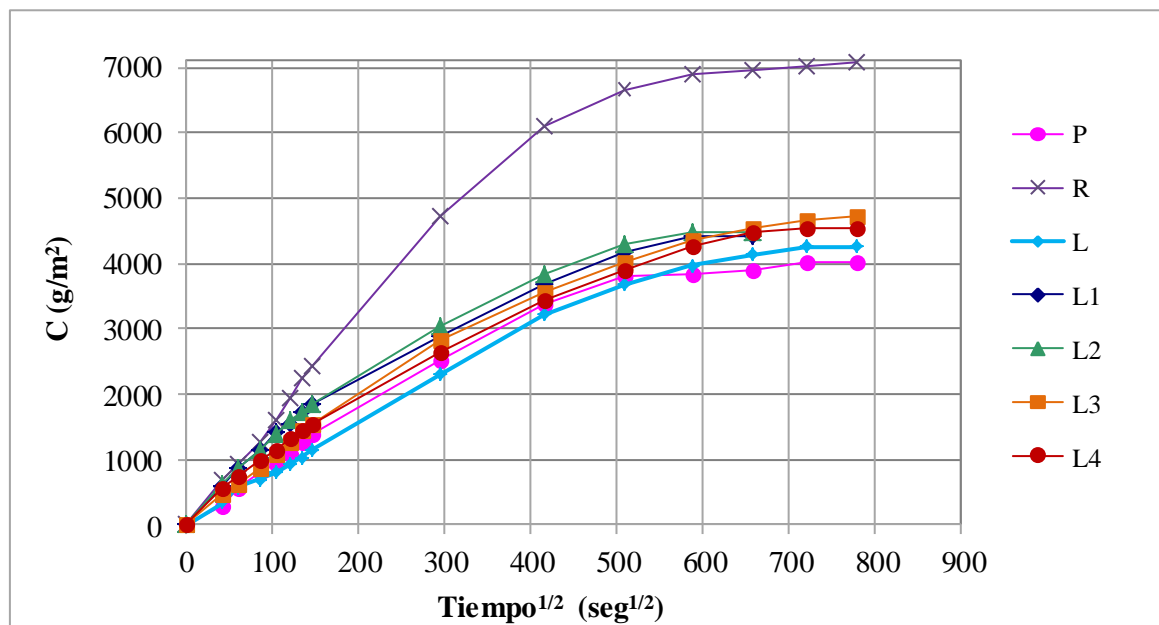


Figura 5.7: Curvas de absorción capilar en función del tiempo de los distintos hormigones elaborados

En la Tabla 5.23 se muestra una comparación porcentual respecto al hormigón patrón (P), de los valores de Capacidad de Succión Capilar (C) y Velocidad de Succión Capilar (V) determinados en el ensayo de absorción capilar,.

Tabla 5.23: Capacidad de Succión Capilar (C) y Velocidad de Succión Capilar (V).

PROBETA	C [g/m ²]	C [%]	V (g/m ² s ^{1/2})	V [%]
P	4023	100	7,9	100
R	7069	176	14,8	187
L	4253	106	7,3	92
L1	4425	110	7,9	100
L2	4483	111	8,5	108
L3	4713	117	7,6	96
L4	4540	113	7,2	91

En la Tabla 5.24 se muestran los valores obtenidos del ensayo de Resistividad Eléctrica (ρ) y una comparación porcentual de los mismos, tomando como referencia, los valores obtenidos para el hormigón patrón, realizado sin agregado reciclado (P).

Tabla 5.24: Resistividad Eléctrica (ρ) de los distintos hormigones elaborados

PROBETA	ρ [Ω .m]	ρ [%]
P	62	100
R	35	56
L	58	94
L1	55	89
L2	58	93
L3	55	88
L4	54	87

5.3.3.6 DISCUSIÓN

Como sucedió en los casos anteriormente estudiados, los resultados de resistencia a compresión del hormigón indican que al reemplazar un 50 % del agregado natural por agregado reciclado, se obtiene un material con buena prestación mecánica, como para ser utilizado en estructuras resistentes. De todas formas, en la Tabla 5.22 se observa una mejoría en los valores de resistencia a compresión, en todos los casos en los que se aplicó un tratamiento previo sobre los agregados reciclados.

Por otro lado se observó, así como en los puntos previos, en el hormigón reciclado sin tratamientos previos, los valores de absorción capilar son elevados respecto a los hormigones elaborados en forma convencional, y los de resistividad claramente inferiores, esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad.

En la Figura 5.7 y en la Tabla 5.23 se observa que los hormigones elaborados con agregado grueso reciclado, al que se le aplicó previamente un tratamiento con lechada de cemento, ya sea en forma simultánea o no al mezclado, en todos los casos mostraron similares valores de succión capilar que el hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregados reciclados (P), esto demuestra la efectividad del tratamiento.

Además, en la Tabla 5.24 se observa una disminución de casi un 50 % del valor de resistividad, entre un hormigón patrón (P) y el hormigón elaborado con agregado reciclado sin tratamientos previos (R). Por otro lado, los hormigones reciclados cuyos agregados fueron sometidos a tratamientos previos, tuvieron una mejoría en sus valores de resistividad, siendo los más eficientes, los tratamientos L y L2, alcanzando un 94 y 93% respectivamente del valor obtenido en el hormigón patrón (P). Además, el tratamiento menos eficiente obtuvo un 87 % de la resistividad correspondiente al hormigón patrón, siendo este valor, de todas formas, un 54 % superior al agregado reciclado sin tratamiento previo (R), indicando que pese a ser el menos efectivo, produce una mejora nada despreciable.

Los tratamientos previos simultáneos al mezclado, permiten una aplicación más fácil, directa y económicamente viable, teniendo en cuenta las prácticas habituales de construcción, que aquellos que se realizan en forma no simultánea. De todas formas, ambas opciones presentan



buenos resultados, brindando diferentes alternativas a la hora de elaborar hormigones reciclados.

5.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

El reciclado de hormigón no tiene solamente un impacto económico, sino también ambiental y social, sin embargo, para poder proyectar y diagramar su aplicación, es imprescindible conocer la implicancia sobre los costos de fabricación que tiene la utilización del agregado reciclado, con o sin tratamientos sobre los mismos.

La aplicación de los tratamientos previos, no simultáneos al mezclado, representa un aumento del costo de fabricación del m^3 de hormigón, no solo por el valor comercial de los productos adicionales utilizados para ello, sino también, por los costos generados en el proceso de ejecución de dichos tratamientos. Una alternativa para el desarrollo de los mismos, es introducirlos mediante cambios en el proceso de fabricación del agregado reciclado, pero la implicancia económica en este aspecto, no puede determinarse en forma fehaciente, por lo tanto, la comparación entre los diferentes casos, no tendrá en cuenta los costos de ejecución de los tratamientos.

Con el objetivo de realizar una comparación entre los costos de fabricación de los distintos hormigones descritos en este capítulo, se tomó como valor de referencia al de fabricación de $1 m^3$ de hormigón de características mecánicas similares. Este valor se determinó como el promedio de los costos por m^3 de hormigón, proveniente de diferentes plantas hormigoneras de la ciudad de Bahía Blanca.

Por otro lado, se determinaron los materiales adicionales utilizados en cada tratamiento previo, considerando la relación agua / producto empleado en cada caso, y la cantidad de producto necesario para realizar el tratamiento al agregado reciclado destinado a fabricar $1 m^3$ de hormigón reciclado.

Considerando un reemplazo del 50 % de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado de hormigón, en la dosificación del hormigón, se desarrolló la Tabla 5.25, en la cual se muestran la relación agua / producto y la cantidad de producto (para realizar el tratamiento) necesaria en cada m^3 de hormigón.

Tabla 5.25: Relación agua producto y cantidad necesaria en cada tratamiento

Tipo de tratamiento	Relación agua/ producto	Cantidad Producto / m ³ H ^o (kg)
Lechada de cemento - TP1	0,50	155
Lechada de cemento - TP 2	0,74	105
Lechada de cemento - TP 3	1	39
Producto A	1	66
Producto B	0,53	166
Mezclado Simultáneo (Cemento)	0,50 - 1	-

También se tuvo en cuenta la reducción en el costo del agregado reciclado respecto al agregado natural, que como se mencionó en el Capítulo 4 es alrededor de U\$S 8 por m³ de material.

En base a la cantidad de material empleado para cada tratamiento y de acuerdo al costo en que dichos productos se obtienen en el mercado, se realizó una comparación porcentual del incremento de los costos de fabricación de 1 m³ de hormigón, tomando como patrón el costo de un hormigón convencional H25, como se observa en la Tabla 5.26.

Tabla 5.26: Comparación porcentual de costos de los diferentes tratamientos previos

Tipo de Hormigón	Costo de referencia (%)	Costo Tratamiento (%)	Reducción 50% AR (%)	Costo Total (%)
Convencional (P)	100	-	-	100
Reciclado sin tratamiento (HR50)	100	-	1,5	98,5
Reciclado con tratamiento no simultáneo				
- Lechada de cemento				
TP1	100	18,6	1,5	116,1
TP 2	100	12,6	1,5	111,1
TP 3	100	4,7	1,5	103,2
- Producto A	100	290	1,5	388,5
- Producto B	100	170	1,5	268,5
Reciclado con tratamiento simultáneo	100	-	1,5	98,5

Cabe aclarar, que para esta comparación se tuvieron en cuenta las dosificaciones utilizadas en este capítulo, con un reemplazo del 50 % de agregado natural por agregado reciclado y con una relación agua/cemento de 0,50.

5.4.1 DISCUSIÓN

Si se realiza un análisis meramente económico, se podría decir que el único tratamiento no simultáneo sobre el agregado reciclado, que podría ser aplicado sin grandes costos adicionales en la fabricación del hormigón, es el de lechada de cemento, que de acuerdo a la relación agua/cemento utilizada (TP1, TP2 y TP3), ocasiona un aumento en el valor del m³ de hormigón entre un 3,2% y un 16,1%. Este tratamiento además, mostró resultados favorables en cuanto a las mejoras sobre el hormigón resultante.

La ejecución de los otros tratamientos (productos A y B), brinda información valiosa, aun cuando los resultados obtenidos por la aplicación de los mismos, no sean los más satisfactorios en cuanto a costos y beneficios obtenidos. Por un lado, ambos casos, en mayor o menor medida, generaron mejoras en las propiedades del hormigón resultante, lo cual confirma que la realización de tratamientos previos es una opción posible para mejorar las propiedades durables del hormigón resultante, y por otro lado, abre las posibilidades a la aplicación de muchos productos comerciales del mismo tipo, con diferentes costos, y en los que se puede variar la relación agua/producto para hacer el tratamiento económicamente viable.

Queda claro, que la aplicación de los tratamientos simultáneos al mezclado son las opciones de mayor viabilidad económica, pues no solamente no generan costos adicionales en su aplicación, sino que mantiene los beneficios económicos y sociales que implica la utilización del agregado reciclado.

5.5 CONCLUSIONES

Los ensayos realizados sobre el agregado reciclado utilizados en estos estudios, mostraron que, en comparación con el canto rodado, la densidad fue un 10 % menor, la absorción de agua experimentó un importante aumento y el desgaste por abrasión (ensayo “Los Ángeles”) fue casi el doble.



Los resultados experimentales sobre el hormigón reciclado, tanto en los que se realizó un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural, como en los que se reemplazó un porcentaje más importante (75 %), muestran que se obtuvo un material de buena prestación, como para ser utilizado en estructuras resistentes.

Los valores de absorción capilar y de resistividad observados en todos los casos en los que no se aplicaron tratamientos previos, se mostraron elevados respecto a los hormigones elaborados en forma convencional, esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad. Por este motivo, el hormigón elaborado con agregados reciclados, es un material más vulnerable frente al ingreso de agentes externos que pueden producir reacciones deletéreas y afectar su durabilidad.

El uso de aditivos es una alternativa para mejorar la estructura de poros del mortero, pero las características durables del hormigón reciclado resultante, mantienen una diferencia apreciable frente a los hormigones elaborados en forma convencional.

Los hormigones elaborados, con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado de hormigón, al cual se le aplicaron los tratamientos previos de lechada de cemento y de producto A, mostraron una clara modificación de su estructura de poros, respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, presentando un comportamiento mecánico, de absorción capilar y resistividad similares al que posee el hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregado reciclado.

La utilización del producto B para la realización del tratamiento previo del agregado reciclado, no permitió una importante disminución de la absorción capilar del hormigón elaborado utilizando el mismo como agregado grueso. Esto podría deberse a que se usó una inadecuada relación agua / producto en la solución adoptada.

Los hormigones elaborados, con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado de hormigón, al cual se le aplicaron los tratamientos previos de lechada de cemento, variando la relación agua/cemento de la lechada (TP1, TP2 y TP3) y los días de secado del agregado luego del tratamiento (1 a 28 días), mostraron una clara modificación de su estructura de poros, respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, presentando un



comportamiento similar al hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregado reciclado.

Por otro lado, los valores de resistencia a compresión y de absorción capilar de los hormigones y tratamientos mencionados en el párrafo anterior, no mostraron variaciones apreciables para los diferentes casos. Esto permite afirmar que para el rango de relaciones agua/cemento utilizado en este estudio, la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico sería el uso de la mayor de ellas (agua / cemento = 1). Además, estos resultados muestran la versatilidad de realización del tratamiento previo, pues no requiere de tanta precisión.

El tiempo de secado de la lechada con la que se trató el agregado reciclado no influyó en los resultados finales. Esto se cumplió para todas las relaciones agua / cemento de las lechadas.

El uso de tratamientos previos al agregado reciclado de hormigón, es una alternativa para mejorar la estructura de poros del hormigón elaborado con dicho agregado, y llevarlo a un comportamiento similar al de un hormigón tradicional.

Los hormigones elaborados, con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado de hormigón, al cual se le aplicaron los tratamientos previos simultáneos al mezclado, mostraron una clara modificación de su estructura de poros, respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, presentando un comportamiento mecánico, de absorción capilar y resistividad similar al hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregado reciclado.

El uso de estos tratamientos previos al agregado reciclado de hormigón, es una alternativa muy interesante para mejorar la estructura de poros del hormigón elaborado con dicho agregado, tal que posea un comportamiento similar al de un hormigón tradicional. Siendo las opciones L1 a L4 (simultáneas al mezclado), las que brindan una aplicación simple y directa en la industria de la construcción.

La aplicación de los tratamientos simultáneos al mezclado son las opciones de mayor viabilidad económica, pues no generan costos adicionales en su aplicación y mantiene los



beneficios ambientales, económicos y sociales que implica la utilización del agregado reciclado.

La aplicación de los tratamientos no simultáneos al mezclado implica un aumento en los costos de producción de hormigón, que varía según el material con el cual se hace el tratamiento, siendo el cemento el producto que brinda mejores relaciones costo / beneficio. Si bien la realización de este tipo de tratamientos es más compleja y antieconómica, abre la posibilidad de utilización de infinidad de productos para realizar los tratamientos, incluso podría pensarse en utilizar otros desechos reciclados de distinta procedencia, como por ejemplo, catalizadores de procesos petroquímicos.

5.6 REFERENCIAS

- [1] Ryu J.S., “An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties.” Magazine of Concrete Research, 54, 1, 2003, 7 – 12.
- [2] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1627: Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón, Buenos Aires., 1997.
- [3] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1562: Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de agua, Buenos Aires, 1997.
- [4] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1532: Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método “Los Ángeles”, Buenos Aires, 2009.
- [5] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1536: Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono, Buenos Aires, 1978.
- [6] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1602: Determinación del contenido de aire incorporado al hormigón fresco, Buenos Aires, 1988.
- [7] Di Maio A., “Reciclado de hormigones, Nuevos hormigones y sus aplicaciones.”, Jornadas organizadas por el LEMIT-CIC, La Plata, 2004.
- [8] Hansen T.C. and H. Narud H., “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate.”, Concrete International, January, 1983, 79-83.
- [9] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1871: Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, Buenos Aires, 2004.
- [10] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1546: Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión, Buenos Aires, 1992.
- [11] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1658: Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral, Buenos Aires, 1995.
- [12] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1534: Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y tracción por compresión diametral, Buenos Aires, 2004.
- [13] CIRSOC, Reglamento 201: Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado., Buenos Aires, 1, 6, 1984.



- [14] Wenner F., "A Method of measuring earth resistivity". Bull, National Bureau of Standards, Bull 12, 4, 1915, 258, 478-496.
- [15] Andrade C., D'Andréa R., Castillo A., Castellote M. "The use of electrical resistivity as ndt method for specification the durability of reinforced concrete" NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, Francia, 2009.
- [16] UNE 83988-2. Durabilidad del hormigón. Determinación de la Resistividad Eléctrica. Parte 1: Método directo (Método de referencia), Madrid, 2008.
- [17] UNE 83988-2. Durabilidad del hormigón. Determinación de la Resistividad Eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner, Madrid, 2008.
- [18] Morris W., Moreno E.I., Sagues A.A., "Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a wenner array probe". Cement and concrete research, 26, 12, 1995, 1779-1787.
- [19] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales 1666-3. "Hormigón de cemento portland. Hormigón elaborado. Uniformidad del hormigón del pastón", Buenos Aires, 1986.

CAPÍTULO 6

CORROSIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN RECICLADO

CAPÍTULO 6

CORROSIÓN EN ELEMENTOS DE HORMIGÓN RECICLADO

6.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En la industria de la construcción, uno de los materiales más utilizados con fines estructurales es el hormigón armado. La durabilidad de estas estructuras puede verse afectada, entre otros motivos, como consecuencia de la corrosión de sus armaduras, que inicialmente provoca fisuras en el recubrimiento de hormigón, lo que favorece la agresión de las armaduras, provocando una disminución de la sección del acero [1-4], afectando a la adherencia entre estos dos materiales [4-6]. De esta manera, a medida que avanza el deterioro, disminuye la capacidad portante de la estructura afectada y se puede llegar al colapso de la misma [7-9].

Como se mencionó en capítulos anteriores, los hormigones reciclados tienen inconvenientes en lo que respecta a su durabilidad, por su alta porosidad y pueden tener inconvenientes en la interfase entre el viejo hormigón y la pasta de cemento, que lo hacen más susceptible a los agentes externos. Por este motivo, es importante conocer el comportamiento de los hormigones reciclados ante procesos de corrosión de las armaduras, si se desea utilizar este tipo de materiales en estructuras resistentes. Con esta premisa, es que se desarrolló el presente capítulo.

6.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL EMPLEADA

En este capítulo se estudia el comportamiento electroquímico y mecánico, ante el efecto de la corrosión acelerada generada por la aplicación de una corriente galvanostática, en vigas de hormigón armado, elaboradas con algunos de los hormigones proyectados en el Capítulo 5.

Las dimensiones geométricas de las vigas, las secciones de las barras de acero, como asimismo la granulometría y los tamaños nominales de los agregados empleados en su elaboración, mantienen una semejanza geométrica con los usados en las obras reales.

En todos los casos que se expondrán en este capítulo, se construyeron vigas de hormigón armado, de 1,10 m de longitud (Figura 6.1), con una armadura longitudinal formada por

cuatro hierros de 4,2 mm de diámetro nominal (dos en el cordón superior y dos en el inferior), y estribos cerrados realizados en alambre de 2,1 mm de diámetro nominal. En cada caso, se aclara, los recubrimientos y materiales utilizados.

Los recubrimientos (superior y laterales) de las armaduras longitudinales, se aseguraron mediante separadores de diferente espesor, asegurando la relación recubrimiento/diámetro (r/ϕ) para los estribos, requerida en cada caso.

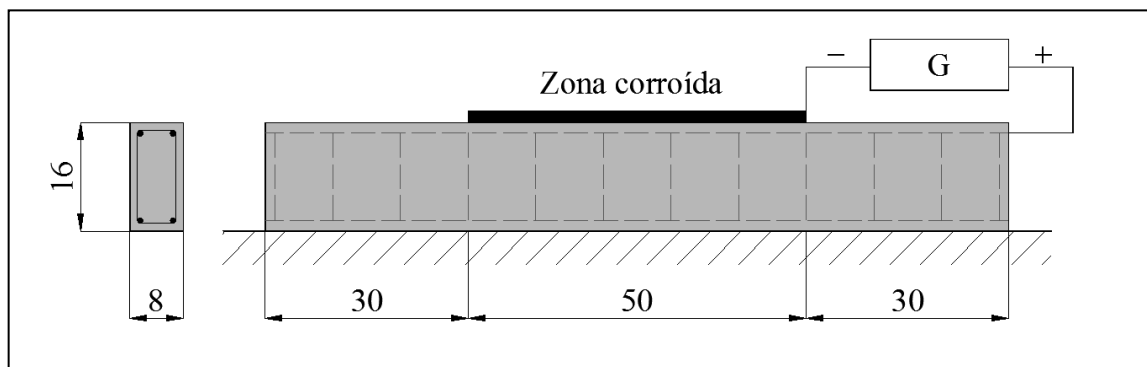


Figura 6.1 Esquema de una viga durante el ensayo (dimensiones en cm)

Para minimizar las tensiones a las que pudieran estar expuestas las armaduras de las vigas, debido a las cargas actuantes, se las ensayó sin carga, e incluso fueron apoyadas en toda su longitud (reduciendo los efectos mecánicos del peso propio). Es claro que no podría asegurarse que las tensiones fueran nulas, por cuanto es inevitable la aparición de pequeños esfuerzos de compresión en las mismas debidos, fundamentalmente, a los efectos de la contracción del hormigón.

El hormigón empleado en la elaboración de las vigas respondió a las características mostradas en cada caso, mientras que las del acero utilizado, se indican en la Tabla 6.1

Tabla 6.1: Características de las armaduras

Mezcla HR50	Tipo de acero	Diámetro (mm)
Armadura longitudinal	Dureza Natural de dureza natural-ADN 420 [10]	4,2
Estribos	Alambre recocido	2,1

Es importante destacar, que se trató de reproducir en los elementos de hormigón, durante todo el desarrollo del ensayo, condiciones similares a las que ocurren habitualmente en la práctica. El hormigón fue colado en los encofrados y vibrado mecánicamente en tres capas (con vibrador de laboratorio, diámetro de aguja 25 mm, frecuencia 10.500 r.p.m.).

Se sometió a las vigas a un curado, humectándolas y manteniéndolas cubiertas durante los primeros 7 días. Posteriormente, se almacenaron hasta el momento del ensayo (llevado a cabo a los 3 meses), en ambiente de laboratorio (temperatura $\approx 20^\circ \text{C}$, humedad relativa $\approx 50\%$).

6.2.1 PROCESO DE CORROSIÓN ACELERADA

A los 3 meses de su fabricación, las armaduras fueron sometidas a un proceso de corrosión acelerada, a lo largo de aproximadamente 4 meses, mediante la aplicación de una corriente cuya densidad fue de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, provista por un galvanostato. Esta fue aplicada sobre la superficie del hormigón en la parte superior de la viga, a través de un contraelectrodo, formado por una malla de acero inoxidable (de 50 cm de largo e igual ancho que la viga). Sobre el mismo se dispuso una esponja (de iguales dimensiones), que se mantuvo humectada con una cantidad permanentemente controlada de una solución de un 0,3 % (en peso) de Cloruro de Sodio, que permitió aumentar la conductividad del medio. Cabe acotar que no se usó una concentración mayor, a los efectos de reducir el ataque localizado en las barras, que producen los cloruros.

Es conocido que los óxidos poseen un volumen mayor que el acero original, difundiéndose dentro del hormigón, por su estructura de poros, hasta que los llenan, originando presiones internas, que terminan por fisurar al recubrimiento de hormigón.

Con el fin de asegurar que esa humectación fuera constante (tratando de reducir la evaporación) se las cubrió con una placa de acrílico y luego con una cobertura de nylon.

Los galvanostatos fueron fabricados especialmente para ensayos a corrosión de vigas de hormigón armado, como los que integran esta Tesis, por el laboratorio de Electrónica del Centro Regional de Investigaciones Básicas y Aplicadas de Bahía Blanca (CRIBABB).

La densidad de corriente empleada, que fue de 100 mA/cm², es alrededor de diez veces la medida en estructuras de hormigón armado altamente corroídas [11], fue elegida por haber sido adoptada en distintos trabajos sobre el tema [7,12,13], ya que permite obtener penetraciones de ataque de cierta importancia, en tiempos relativamente cortos.

En este caso, con esta corriente se desea obtener, en un período de aproximadamente 90 días, una penetración media teórica de la corrosión en las armaduras, del orden de 0,30 mm. La profundidad del ataque sobre las barras metálicas se determinó, en forma teórica, a partir de la Ley de Faraday [12]:

$$P = 0,032 \cdot i_{corr} \cdot t \quad (6.1)$$

donde:

P : pérdida de radio o profundidad del ataque (μm);

0,032: factor de conversión de unidades;

i_{corr} : valor medio de la densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);

t : tiempo del ensayo (días).

6.2.2 ENSAYOS

Desde el comienzo de la humectación y aplicación galvanostática de la densidad de corriente de prueba, se realizó un seguimiento de la superficie de las vigas, observando diariamente y registrando el momento de aparición de las primeras manchas y de las primeras fisuras. A partir del surgimiento de las primeras fisuras, se efectuó periódicamente la medición del largo (con regla graduada al milímetro) y ancho de las mismas. Este espesor de fisuras, se obtuvo por comparación con una reglilla graduada, con una graduación mínima de 0,05 mm, como puede apreciarse en la fotografía de la Figura 6.2. Esta tarea, se efectuó a fines de hallar los Anchos máximos de Fisuras y a las Áreas de Fisuración (largo x ancho).



Figura 6.2 Medición del ancho de fisuras

Paralelamente, se registraron los Potenciales de Corrosión, para efectuar un seguimiento electroquímico del fenómeno, de acuerdo a los procedimientos normalizados [14]. Estos se midieron con un voltímetro marca CANIN (PROCEQ), empleando un electrodo de referencia de Cobre – Sulfato de Cobre (CSC), especialmente fabricado para realizar mediciones en hormigón.

Inicialmente, se efectuó esta medición en seco (con la humedad natural de la viga), para tener una referencia inicial de su estado general, en los puntos que se iban a controlar a lo largo del ensayo. Luego se humectó durante 2 días, hasta alcanzar el estado de humectación constante con la solución de NaCl y, posteriormente, se aplicó galvanostáticamente la densidad de corriente de prueba. Bajo estas condiciones, se siguió durante aproximadamente 120 días, la evolución de los Potenciales de Corrosión en diversos puntos característicos de la viga (sobre las zonas seca y humectada, en coincidencia o no con los estribos).

Se supuso inicialmente, como hipótesis de trabajo, un área afectada por la corrosión, formada en las barras superiores por su perímetro y 50 cm de longitud, más la correspondiente a todos los estribos ubicados en esta zona, hasta una longitud vertical, de 1 cm.

Posteriormente, se efectuó el descubrimiento de las barras, relevándose su deterioro, y finalmente se realizó una gravimetría, para determinar las particularidades de corrosión registradas en cada caso analizado.

6.3 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO EN LA CORROSIÓN DE ARMADURAS EN HORMIGONES RECICLADOS

6.3.1 INTRODUCCIÓN

Se sometieron vigas de hormigón armado, en cuya elaboración se reemplazó el 50 % del agregado natural, por agregado reciclado, a un proceso de corrosión acelerada de sus armaduras. En dichas vigas se varió la relación recubrimiento / diámetro, a los efectos de analizar su influencia sobre el proceso de corrosión de las armaduras. La información obtenida resulta de interés, para determinar el comportamiento de estos hormigones, que deben proteger a las armaduras, al estar expuestos a condiciones de agresividad externas.

6.3.2 TRABAJO EXPERIMENTAL

6.3.2.1 MATERIALES Y MEZCLAS

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40), proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceo proveniente de un yacimiento ubicado en la zona rural del partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [15].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado cuyo Tamaño Máximo Nominal es de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [15], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.
- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de elementos de hormigón elaborado con canto rodado, proveniente de distintas obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.

El hormigón fue elaborado manteniendo constante la relación agua/cemento (a/c) en 0,50, valor adoptado por la normativa argentina [16], para estructuras resistentes que se encuentren a más de 1 Km de la costa, en zona influenciada por vientos con sales marinas. En la mezcla de este hormigón se reemplazó el 50 % del agregado natural por agregado reciclado, por este motivo, de aquí en adelante será identificado como HR50. Un detalle de la dosificación usada se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Proporciones de la mezcla, realizada con a/c = 0,50

Mezcla HR50	Proporciones
Cemento (kg/m ³)	350
Canto Rodado (kg/m ³)	465
Agregado Reciclado (kg/m ³)	443
Agregado fino(kg/m ³)	895

6.3.2.2 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Se fabricaron 4 vigas de hormigón armado en las que se varió la relación recubrimiento / diámetro de las barras, para simular distintos grados de protección de las armaduras, y se moldearon probetas cilíndricas, con el objeto de caracterizar su comportamiento mecánico (compresión y tracción) y físico (ensayo de absorción capilar).

Las muestras elaboradas fueron las siguientes:

a) Como se mencionó al comienzo de este Capítulo, se ensayaron vigas de dimensiones: 8 x 16 x 110 cm, armadas con barras de acero de dureza natural (ADN 420, IRAM-IAS U 500-528) [10], de diámetro nominal 4,2 mm y estribos de acero liso, de diámetro 2,1 mm, con un recubrimiento que varió entre 10 mm y 25 mm.

b) Probetas cilíndricas de hormigón (15 x 30 cm), empleadas en los ensayos físicos de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) [17] y mecánicos: resistencia a compresión (IRAM 1546) [18] y a tracción indirecta (IRAM 1658) [19]. Estas probetas se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [20].

En el Apéndice C se muestran fotografías referidas al hormigonado de vigas y probetas correspondientes a este capítulo de la presente tesis.

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las vigas, de acuerdo a la relación recubrimiento / diámetro de las armaduras, se las denominó como se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Relaciones recubrimiento / diámetro utilizadas.

Elemento	Relación recubrimiento / diámetro (r/ϕ)
Viga 1	2,4
Viga 2	3,6
Viga 3	4,8
Viga 4	6,0

6.3.2.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La aplicación del método acelerado de corrosión sobre las vigas se realizó de acuerdo a lo explicado en 6.1.2.1, y el seguimiento electroquímico y las medición de fisuración se ejecutaron de acuerdo a lo especificado en el punto 6.1.2.2.

6.3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.3.3.1 CARACTERIZACIÓN

En la Tabla 6.4 se puede apreciar un detalle de los resultados obtenidos en los ensayos sobre la caracterización de las propiedades del hormigón.

Tabla 6.4: Características del hormigón empleado en las vigas ensayadas.

PROBETA	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]	Capacidad de Succión Capilar [gr/m²]	Velocidad de Succión Capilar [gr/m².s^{1/2}]
HR50	32,6	2,3	7069	12,0

Observando los resultados experimentales sobre el hormigón, se puede decir que, si bien se reemplazó un 50 % del agregado natural por agregado reciclado, la resistencia a compresión del mismo muestra que se obtuvo un material con buenas prestaciones, como para ser utilizado en estructuras resistentes. Sin embargo, tanto la capacidad como la velocidad de succión capilar son elevadas respecto a las de hormigones elaborados en forma convencional. Esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad que los agregados naturales.

6.3.3.2 POTENCIALES DE CORROSIÓN

En la Figura 6.3 se muestran los promedios de 5 puntos, donde se midieron los potenciales de corrosión en la zona central afectada de las 4 vigas.

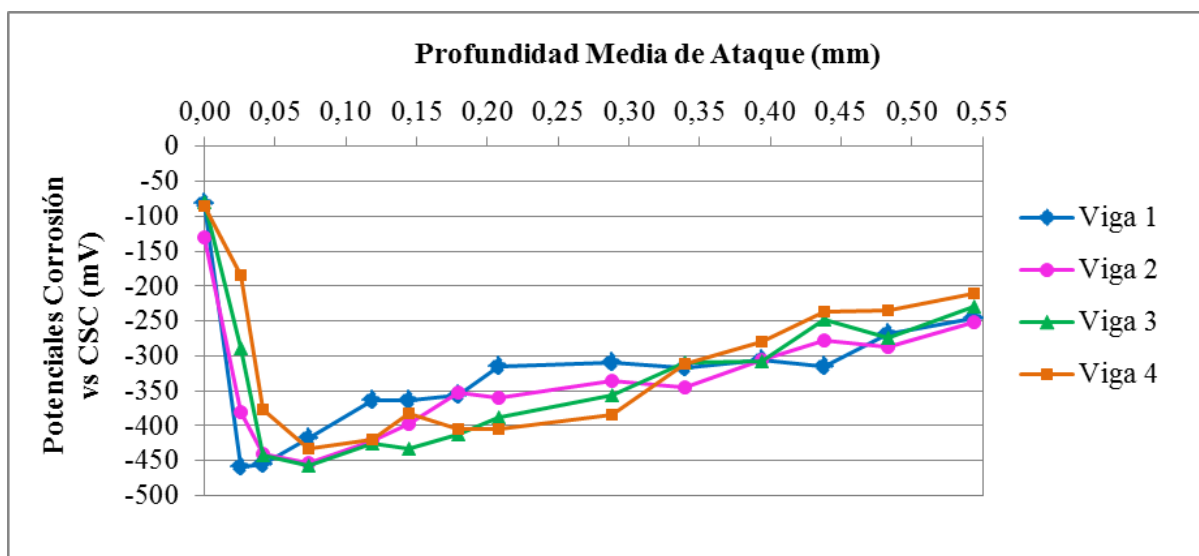


Figura 6.3: Potenciales de corrosión en función del tiempo

El comportamiento electroquímico analizado en las cuatro vigas, a través del seguimiento de los Potenciales de Corrosión, no mostró diferencias muy notables. Solamente en el inicio del período en estudio, conocido como de activación o despasivación de las armaduras, se notó una diferencia entre las distintas vigas, en el cual, aquellas que poseían menor recubrimiento mostraron sus picos de potencial con anterioridad a las de mayor recubrimiento, siempre dentro del rango de valores de potenciales entre 0 y -470 mV. Posteriormente, se presentó un proceso de pseudo-pasivación y generalización de la fisuración, que fue similar en todas las vigas.

6.3.3.3 FISURACIÓN

En la Figura 6.4 se muestra la variación del Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media del Ataque sobre las barras metálicas, determinada en forma teórica mediante la Ley de Faraday.

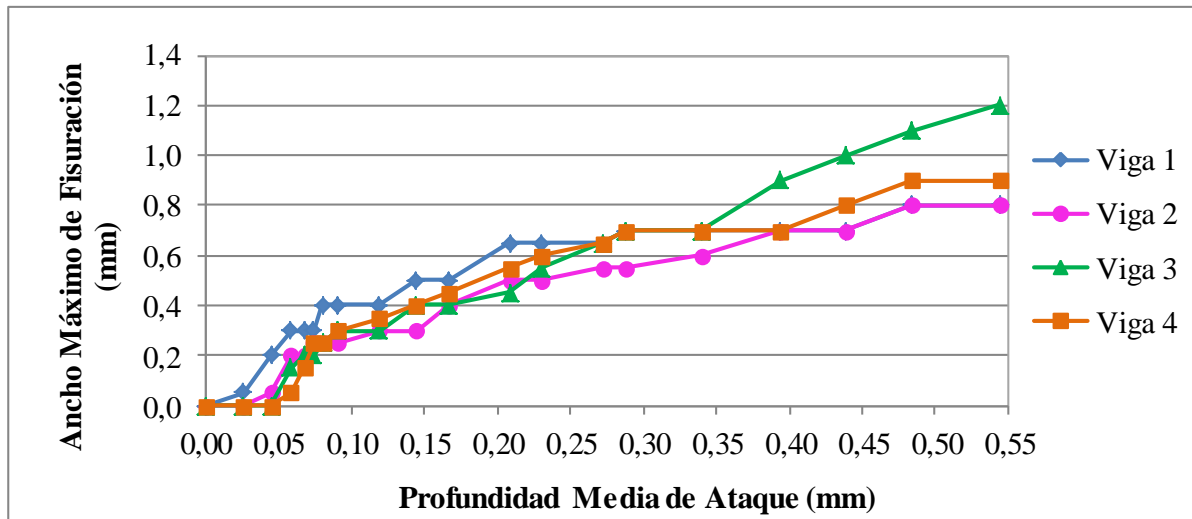


Figura 6.4: Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Prof. Media de Ataque a las armaduras.

Se pudo observar que el Ancho Máximo de Fisuración, durante la primer etapa del ensayo, es mayor en las vigas de menor relación r/ϕ y luego se revierte esta situación. Esto se debió a que la distribución de la fisuración se desarrolló en forma diferente en cada viga, puesto que las vigas 1 y 2 mostraron fisuras de mayor longitud y en las caras laterales y superiores cercanas a la armadura corroída, mientras que las vigas 3 y 4 mostraron fisuras de menor longitud y de mayor ancho.

En la Figura 6.5 se aprecia el avance del Área de Fisuración de cada viga, en función de la Profundidad Media del Ataque sobre las barras metálicas, determinada en forma teórica mediante la Ley de Faraday. En la misma, se observa que el Área de Fisuración es menor para aquellas vigas con una relación r/ϕ superior, hasta llegar a una profundidad media de ataque de 0,48 mm aproximadamente, donde la diferencia entre el Área de Fisuración de todas las vigas comienza a ser muy reducida.

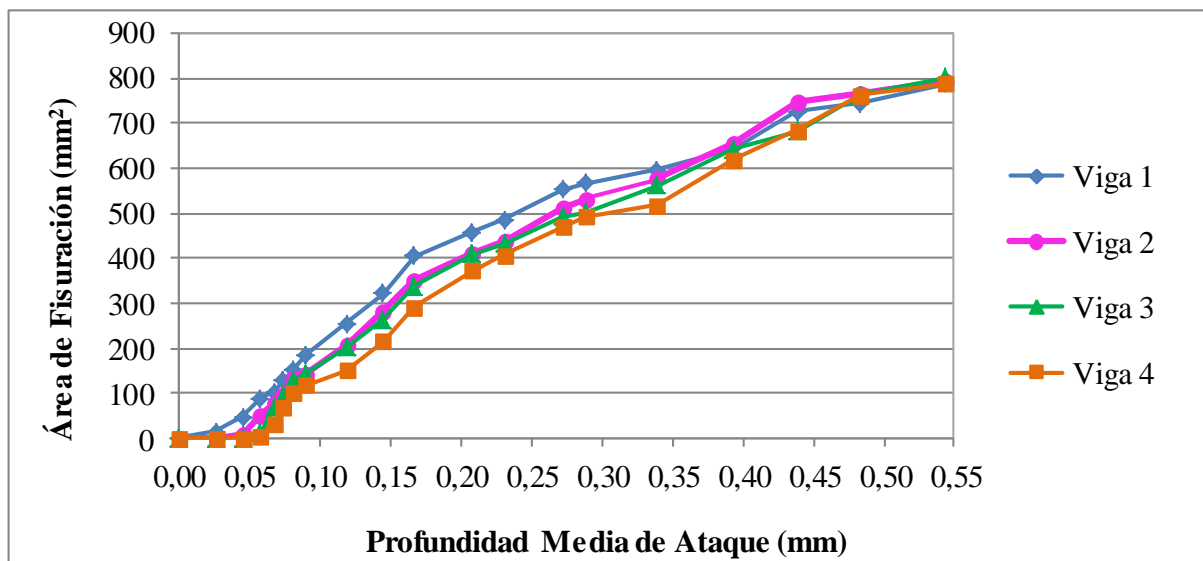


Figura 6.5: Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras.

Además, como era previsible, el inicio de la fisuración se manifestó más tarde en las vigas con mayor recubrimiento. En la Figura 6.6 se representa la relación entre la profundidad media de ataque a las armaduras que produce la primer fisura visible ($e = 0,05$ mm) y la relación recubrimiento / diámetro de las armaduras.

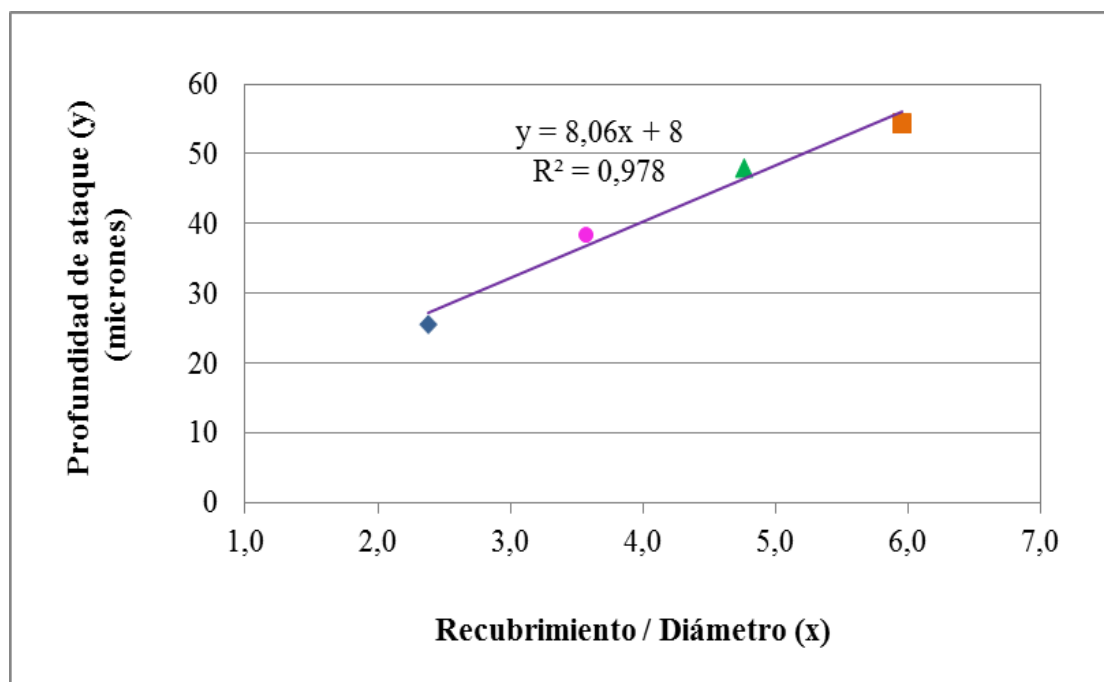


Figura 6.6: Relación entre la Profundidad Media de Ataque a las Armaduras que produce la primer fisura visible ($e = 0,05$ mm) y la relación recubrimiento / diámetro

Si bien, esta ecuación ($y = a + b x$), fue determinada únicamente con un solo valor para cada relación r/ϕ , la misma puede compararse con la obtenida en otras investigaciones [12], donde se utilizaron hormigones convencionales elaborados con relaciones agua / cemento entre 0,52 y 0,65 y cuyos resultados fueron: $a = 7,53$ y $b = 9,32$ ($R^2 = 0,92$). Como puede apreciarse, la pendiente de la recta es superior a la obtenida en el presente trabajo, por lo tanto, se puede decir que, el hormigón reciclado presenta una estructura de poros más abierta que los hormigones elaborados en forma convencional, aun siendo elaborado con una relación agua / cemento inferior (0,50). Estos resultados corroboran lo expresado en 5.3.3.6.

El trabajo antes citado [12], también mostró que las primeras fisuras visibles para relaciones r/ϕ que varíen entre 2 y 3, se generan para valores de penetración del ataque en las armaduras entre 15 y 35 μm , lo cual también se cumple en la investigación objeto de esta tesis.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, la aparición de las primeras fisuras visibles, se ve demorada con el incremento del espesor del recubrimiento (incremento de la relación r/ϕ), por lo que el aumento del espesor del recubrimiento de una estructura de hormigón, no sólo hace que tarden más tiempo en llegar a las armaduras los elementos agresivos desde el exterior (cloruros, oxígeno, agua), sino que una vez despasivado tarda más en aparecer las primeras fisuras y la evolución de las mismas es más lenta.

En el Apéndice D se pueden observar fotografías de las vigas fisuradas una vez terminado en ensayo de corrosión acelerada.

6.3.3.4 RESULTADOS GRAVIMÉTRICOS

Completando el estudio anterior, se picó el hormigón adyacente a las armaduras en la zona afectada por la corrosión, para visualizar el estado de las mismas, realizando un relevamiento de las zonas afectadas por la corrosión, y otro de las picaduras encontradas. Posteriormente se afectó la gravimetría de las barras, de acuerdo a la Norma ASTM G1-90 [21], cuyos resultados se exponen en la Tabla 6.5.

Cabe acotar que un esquema de la zona de armadura afectada por la corrosión, en cada caso, puede verse en el Apéndice D.

Tabla 6.5: Pérdidas gravimétricas en las armaduras

Viga	Barra afectada		Pérdidas (g)		Pérdidas
			Parciales	Total	(%)
Viga 1	Cordón superior	izquierda	29,92	74,41	39,31
		derecha	28,76		37,79
	Cordón inferior	Izquierda	2,01		2,64
		Derecha	1,82		2,39
	Estribos		11,9		26,15
Viga 2	Cordón superior	izquierda	28,9	73,27	37,97
		derecha	30,16		39,63
	Cordón inferior	Izquierda	1,52		2,00
		Derecha	1,89		2,48
	Estribos		10,8		23,74
Viga 3	Cordón superior	izquierda	30,5	72,16	40,07
		derecha	29,36		38,58
	Cordón inferior	Izquierda	0,0		0,00
		Derecha	0,0		0,00
	Estribos		12,3		27,03
Viga 4	Cordón superior	izquierda	29,8	72,35	39,16
		derecha	29,75		39,09
	Cordón inferior	Izquierda	0,0		0,00
		Derecha	0,0		0,00
	Estribos		12,8		28,13

De la inspección visual de las armaduras descubiertas y de los resultados obtenidos en la gravimetría, pueden realizarse algunas observaciones generales:

- a) Debido a la acción de los Cloruros (a pesar de la baja concentración adoptada), la corrosión sobre las barras no fue solamente generalizada, sino que se observaron zonas de corrosión localizada (picaduras);
- b) El ataque de corrosión a las barras en las vigas 1 y 2, no se limitó a las barras superiores y parte superior de los estribos, sino que también se vieron afectados, algunos estribos casi

en su totalidad y también las barras inferiores (aunque con menores profundidades de ataque y con una corrosión uniforme);

- c) La pérdida total de material, aún en las barras más afectadas, no es un indicador concluyente de la peligrosidad del fenómeno, ya que por la presencia de cloruros, la corrosión no fue uniforme. Debido a las picaduras, en determinadas secciones, los diámetros disminuyeron hasta llegar a cortarse la barra, en algunos casos se debilitó la sección del acero resistente a más del 50%; y
- d) Las fisuras del recubrimiento más anchas, se produjeron, en general, en concordancia con las barras que presentaron la mayor pérdida de material. Aunque no existió una correlación directa entre la ubicación de las mayores picaduras y la de los Anchos Máximos de Fisura.

6.4 CORROSIÓN DE ARMADURAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN RECICLADO CON TRATAMIENTOS PREVIOS

6.4.1 INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de conocer la efectividad de los tratamientos previos sobre el agregado reciclado de hormigón, en el desempeño ante la corrosión de armaduras de elementos de hormigón armado, se sometió a un proceso de corrosión acelerada, a las armaduras de vigas de hormigón armado, en cuya elaboración se emplearon distintos tipos de hormigones, obtenidos reemplazando el 50 % del agregado natural, por agregado reciclado sin tratamiento, o sometido a diferentes tratamientos previos a su utilización, con el fin de disminuir su porosidad. Además, se ensayó una viga elaborada con un hormigón patrón, sin el uso de agregados reciclados. En todos los casos, se utilizó una relación recubrimiento de hormigón / diámetro de las barras de 4,8.

Se realizó el seguimiento de la fisuración del recubrimiento de hormigón y de los Potenciales de Corrosión. La información obtenida resulta de interés, para poder determinar la influencia del reemplazo del agregado grueso por hormigón reciclado y de los diferentes tratamientos previos aplicados a este último, en el comportamiento frente a la corrosión, de armaduras ubicadas en vigas elaboradas con estos hormigones.

6.4.2 TRABAJO EXPERIMENTAL

6.4.2.1 MATERIALES Y MEZCLAS

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40) proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceo proveniente de un yacimiento ubicado en la zona rural del partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [15].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado cuyo Tamaño Máximo Nominal es de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [15], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.
- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de elementos de hormigón elaborado con canto rodado, proveniente de distintas obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.
- c) Agregado Reciclado con tratamiento previo: el material obtenido en el inciso b) fue sometido a tres tratamientos diferentes: una lechada de cemento y dos soluciones con la incorporación de aditivos impermeabilizantes de distinta procedencia y de uso comercial.

Se fabricaron distintos tipos de hormigones, elaborados reemplazando el 50 % del agregado grueso natural, por agregado reciclado sin tratamiento, o sometido a diferentes tratamientos previos a su utilización (mencionados anteriormente), con el fin de disminuir su porosidad. Además, se elaboró un hormigón patrón, sin el uso de agregados reciclados

En todos los casos, se mantuvo constante la relación agua/cemento (a/c) en 0,50, valor adoptado por la normativa argentina [16], para estructuras resistentes que se encuentren a más de 1 Km de la costa, en zona influenciada por vientos con sales marinas.

6.4.2.2 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Se fabricaron 5 vigas de hormigón armado con diferentes tipos de hormigones:

- 1- Patrón (P): en su elaboración no hubo reemplazo de agregado natural por agregado reciclado.
- 2- Reciclado sin tratamiento previo (R): en su elaboración se reemplazó un 50 % del agregado natural por agregado triturado de hormigón.
- 3- Reciclado con tratamiento previo: en su elaboración se reemplazó un 50 % del agregado natural por agregado triturado de hormigón sometido a distintos tratamientos:
 - a. Lechada de Cemento (L);
 - b. Solución con Aditivo (A); y
 - c. Solución con Aditivo (B).

También se moldearon probetas cilíndricas, con el objeto de caracterizar el comportamiento mecánico (compresión y tracción) y físico (ensayo de absorción capilar) de cada uno de los hormigones elaborados.

Las muestras elaboradas fueron las siguientes:

- a) Vigas de hormigón armado, de dimensiones: 8 x 16 x 110 cm, armadas con barras de acero de dureza natural (ADN 420, IRAM-IAS U 500-528) [10], de diámetro nominal 4,2 mm y estribos de acero liso, de diámetro 2,1 mm, con un recubrimiento de 20 mm. Estas, fueron usadas en los ensayos de corrosión acelerada. El llenado de los moldes se hizo en dos capas, compactándose mediante el uso de un vibrador y el curado se realizó en ambiente húmedo, durante 28 días en laboratorio, con las siguientes condiciones: 20 ± 2 °C y HR \approx 50 %.
- b) Probetas cilíndricas de hormigón (15 x 30 cm), empleadas en los ensayos físicos de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) [17] y mecánicos: resistencia a compresión (IRAM 1546) [18] y a tracción indirecta (IRAM 1658) [19]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [20].

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las vigas, de acuerdo al tipo de hormigón con el que fueron elaboradas, se las denominó como se muestra en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 – Denominación vigas.

Elemento	Tipo de Hormigón	Características
Viga 1	P	100 % Agregado grueso natural
Viga 2	R	50 % Agrega grueso reciclado sin tratamiento previo
Viga 3	L	50 % Agrega grueso reciclado con trat. previo: Lechada de cemento
Viga 4	A	50 % Agrega grueso reciclado con trat. previo: Solución con Aditivo A
Viga 5	B	50 % Agrega grueso reciclado con trat. previo: Solución con Aditivo B

6.4.2.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La aplicación del método acelerado de corrosión sobre las vigas se realizó de acuerdo a lo explicado en 6.1.2.1, y el seguimiento electroquímico y la medición de fisuración se ejecutaron según lo especificado en el punto 6.1.2.2.

En la Fig. 6.7 se muestra una imagen del ensayo efectuado en algunas vigas de este trabajo., y en el Apéndice E se pueden observar fotografías de las vigas fisuradas una vez terminado el ensayo.



Figura 6.7: Ensayo de corrosión acelerada efectuado sobre las vigas.

6.4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.4.3.1 CARACTERIZACIÓN

En la Tabla 6.7 se puede apreciar un detalle de los resultados obtenidos en los ensayos sobre la caracterización de las propiedades del hormigón.

Tabla 6.7: Características del hormigón empleado en las vigas ensayadas.

PROBETA	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]	Capacidad de Succión Capilar [gr/m ²]	Velocidad de Succión Capilar [gr/m ² .s ^{1/2}]
P	36,4	3,6	4005	7,7
R	32,6	3,0	7014	13,7
L	36,0	3,5	4241	7,2
A	34,5	3,4	4736	7,8
B	25,5	2,7	6079	13,0

De los resultados experimentales determinados en los hormigones, se puede apreciar que aquellos elaborados con agregado grueso reciclado, al que se le aplicó previamente un tratamiento de lechada de cemento (L) y la solución con aditivo A, mostraron similar comportamiento mecánico y de su estructura de poros que el hormigón patrón (P), donde no se utilizó agregado reciclado. Por otro lado, aquellos hormigones elaborados con agregado reciclado sin tratamiento previo y con el tratamiento de solución con aditivo B, mostraron valores inferiores de resistencia mecánica y los valores más elevados de absorción capilar.

6.4.3.2 POTENCIALES DE CORROSIÓN

En la Figura 6.8 se muestra un promedio de cinco puntos donde se midieron los potenciales de corrosión, en la zona central afectada de las cinco vigas.

El comportamiento electroquímico analizado en las cinco vigas, a través del seguimiento de sus Potenciales de Corrosión, no mostró diferencias muy notables. Solamente en el inicio del período en estudio, de activación o despasivación de las armaduras, se notó una diferencia entre los distintas vigas, en el cual las vigas 2 y 5 mostraron sus picos de potencial con

anterioridad a las restantes, siempre dentro del rango de valores de potenciales entre 0 y -550 mV. Posteriormente, se encontró un proceso de pseudo-pasivación y generalización de la fisuración, que fue similar en todas las vigas de este ensayo y de otros registrados en trabajos anteriores [23].

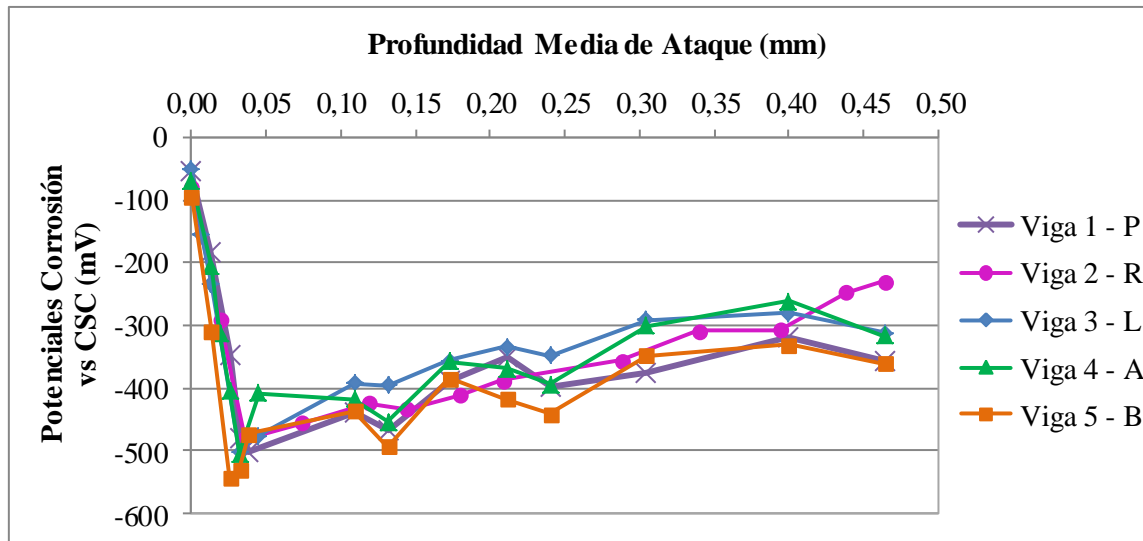


Figura 6.8: Potenciales de corrosión en función de la Prof. Media de Ataque a las Armaduras.

Los hormigones con los que fueron construidas las vigas 2 y 5 mostraron los menores valores de resistencia mecánica y los mayores valores de absorción capilar, por lo tanto, se infiere que cuentan con una estructura de poros más abierta que las restantes permitiendo un paso más rápido de humectación y oxígeno hacia las armaduras, activando antes, el proceso de corrosión

6.4.3.3 FISURACIÓN

En la Figura 6.9 se muestra la variación del Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media del Ataque a las barras metálicas, determinada en forma teórica con la Ley de Faraday (Ecuación 6.1).

Se pudo observar que los Anchos Máximos de Fisuración, durante la primer etapa del ensayo, son similares en todas las vigas, pero a partir de una Profundidad Media de Ataque a las armaduras de unos 0,20 mm, comienzan a diferenciarse con claridad, los mayores anchos de fisuras y el crecimiento más acelerado de los mismos, se registró en las vigas 1, 3 y 4.

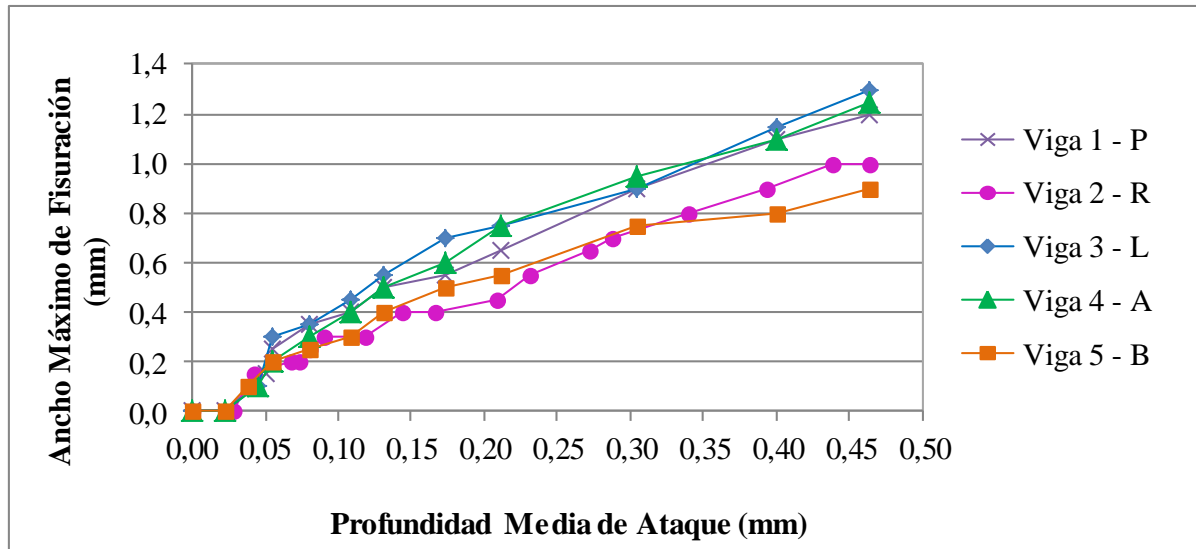


Figura 6.9: Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras.

En la Figura 6.10 se aprecia el avance del Área de Fisuración de cada viga, en función de la Profundidad Media del Ataque sobre las barras metálicas, determinada en forma teórica con la Ley de Faraday.

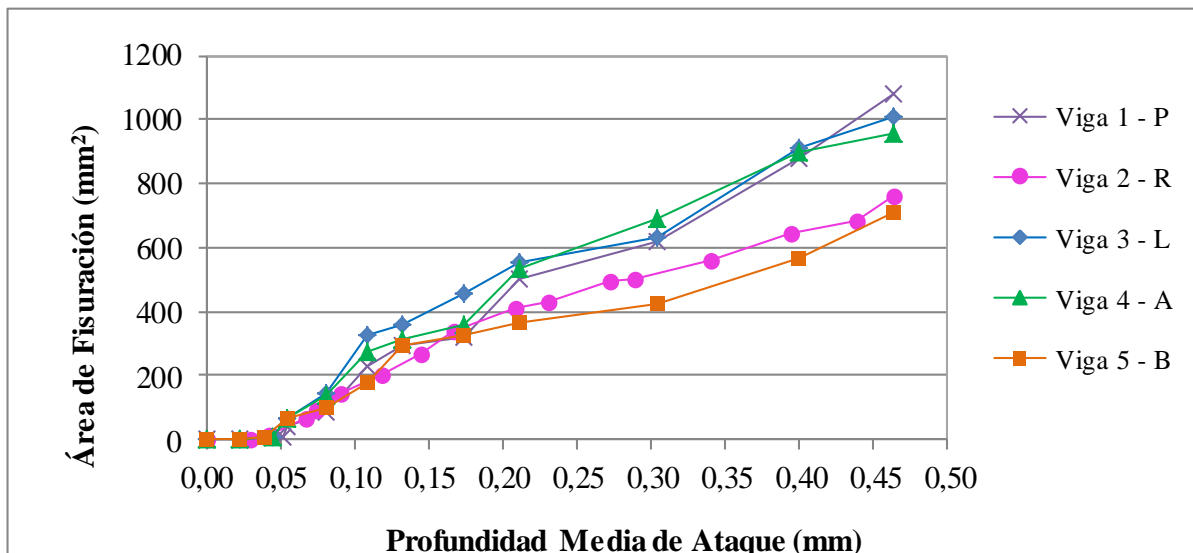


Figura 6.10: Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras.

Sintetizando la información contenida en las Figuras 6.9 y 6.10, en las Tablas 6.8 y 6.9, donde se exponen las tendencias que resultan de aproximar la variación, tanto las Áreas de Fisuración como los Anchos Máximos de Fisuras en el Tiempo, a leyes lineales, obteniéndose buenos ajustes, con Índices de Correlación bastante buenos.

Tabla 6.8: Variación de los Anchos Máximos de Fisuras (y), respecto del Tiempo del proceso (x)

Viga	Ley	Índice de Correlación
Viga 1 - P	$y = 2,6072x + 0,0696$	$R^2 = 0,971$
Viga 2 - R	$y = 2,1843x + 0,0405$	$R^2 = 0,984$
Viga 3 - L	$y = 2,7706x + 0,0855$	$R^2 = 0,953$
Viga 4 - A	$y = 2,7696x + 0,0524$	$R^2 = 0,968$
Viga 5 - B	$y = 1,978x + 0,0683$	$R^2 = 0,947$

Tabla 6.9: Variación de las Áreas de Fisuración (y), respecto del Tiempo del proceso (x)

Viga	Ley	Índice de Correlación
Viga 1 - P	$y = 2390,1x - 60,834$	$R^2 = 0,986$
Viga 2 - R	$y = 1705,3x - 7,5749$	$R^2 = 0,978$
Viga 3 - L	$y = 2285,2x - 7,9741$	$R^2 = 0,969$
Viga 4 - A	$y = 2258x - 22,105$	$R^2 = 0,982$
Viga 5 - B	$y = 1524,2x + 0,7598$	$R^2 = 0,962$

En el seguimiento de la fisuración no se aprecian grandes diferencias en la aparición de las primeras fisuras visibles, sin embargo, se produjeron con anterioridad en las vigas 2 y 5. Además, tanto en las Áreas de Fisuración Totales, como en los Anchos Máximos de Fisura resultaron claramente superiores en las vigas 1, 3 y 4, y las pendientes observadas en el Análisis de Regresión realizado indicaron un crecimiento mayor de estos parámetros en dichas vigas, las cuales fueron elaboradas con hormigones que mostraron mayor resistencia mecánica y menor absorción capilar que las restantes. Esto se debe a que, al presentar una estructura de poros más cerrada, el inicio del proceso de corrosión de las armaduras es más lento, pero una vez que se inicia, los productos de corrosión generados por el mismo, cuentan con menor espacio para alojarse, generando mayores tensiones en el hormigón circundante, y por lo tanto, aparece una mayor fisuración.

6.4.3.4 RESULTADOS GRAVIMÉTRICOS

Completando el estudio anterior, se picó el hormigón adyacente a las armaduras, en la zona afectada por la corrosión, para visualizar el estado de las mismas, realizando un relevamiento

de las zonas afectadas por la corrosión, y otro de las picaduras encontradas. Posteriormente, se afectó la gravimetría de las barras, de acuerdo a la Norma ASTM G1-90 [21], cuyos resultados se exponen en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Pérdidas gravimétricas en las armaduras afectadas.

Viga	Barra afectada		Pérdidas (g)		Pérdidas (%)
			Parciales	Total	
Viga 1 - P	Cordón superior	izquierda	21,30	52,67	27,99
		derecha	20,75		27,26
	Cordón inferior	Izquierda	0,5		0,66
		Derecha	0,32		0,42
	Estribos		9,8		21,54
Viga 2 - R	Cordón superior	izquierda	20,50	52,06	26,94
		derecha	21,36		28,07
	Cordón inferior	Izquierda	0,8		1,05
		Derecha	1,1		1,45
	Estribos		8,30		18,24
Viga 3 - L	Cordón superior	izquierda	20,22	53,66	26,57
		derecha	22,95		30,16
	Cordón inferior	Izquierda	0,72		0,95
		Derecha	0,35		0,46
	Estribos		9,42		20,70
Viga 4 - A	Cordón superior	izquierda	21,20	53,34	27,86
		derecha	21,12		27,75
	Cordón inferior	Izquierda	0,92		1,21
		Derecha	0,85		1,12
	Estribos		9,25		20,33
Viga 5 - B	Cordón superior	izquierda	20,90	53,02	27,46
		derecha	21,76		28,59
	Cordón inferior	Izquierda	1,04		1,37
		Derecha	0,82		0,68
	Estribos		8,8		19,34



Cabe acotar que un esquema de la zona de armadura afectada por la corrosión, en cada caso, puede verse en el Apéndice E.

De la inspección visual de las armaduras descubiertas y de los resultados obtenidos en la gravimetría, pueden realizarse algunas observaciones generales:

- 1- Debido a la acción de los Cloruros (a pesar de la baja concentración adoptada), la corrosión sobre las barras no fue solamente generalizada, sino que se observaron zonas de corrosión localizada (picaduras).
- 2- El ataque de corrosión a las barras no se limitó a las barras superiores y a la parte superior de los estribos (como fue la hipótesis inicial de trabajo), sino que se vieron afectados algunos estribos casi en su totalidad y también las barras inferiores (aunque con menor profundidad de ataque y con una corrosión uniforme).
- 3- La pérdida total de material, aún en las barras más afectadas, no es un indicador concluyente de la peligrosidad del fenómeno, ya que por la presencia de cloruros, no se tuvo corrosión uniforme. Debido a las picaduras, en determinadas secciones, los diámetros disminuyeron hasta llegar a cortarse la barra, en algunos casos la pérdida de sección de acero resistente fue más del 50 %.
- 4- Las fisuras del recubrimiento más anchas, se produjeron, en general, en concordancia con las barras que presentaron la mayor pérdida de material. Aunque no existió una correlación directa entre la ubicación de las mayores picaduras y la de los Anchos Máximos de Fisura.

6.5 ANÁLISIS DINÁMICO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN RECICLADO CON SUS ARMADURAS EN PROCESO DE CORROSIÓN.

6.5.1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras sometidas a procesos de corrosión, sufren daños que afectan, fundamentalmente, a la rigidez de las mismas. Esto se puede observar en el comportamiento dinámico de la estructura, produciéndose una disminución de sus Frecuencias Naturales de Vibración. Por lo tanto, la medición de las mismas, podría ser un indicador representativo del grado de daño de la estructura. La ventaja de este tipo de análisis experimental, es que se trata de ensayos no destructivos, que pueden ser realizados con la estructura en servicio.

Investigaciones realizadas sobre este tema [22], muestran la variación de las Frecuencias Naturales de vigas de hormigón armado elaboradas con la variación de algunos parámetros, por ejemplo, el tipo de curado y el origen y forma de los agregados. Se demostró que en todos los casos, la disminución de la rigidez de las vigas, provocada por el proceso de corrosión, ocasionó el descenso de sus Frecuencias Naturales de Vibración.

En este trabajo se presentan resultados, que tienen como objetivo evaluar el orden de magnitud de la variación de las Frecuencias Naturales de Vibración de algunas de las vigas mencionadas en 6.2 y 6.3 que fueron elaboradas con hormigón reciclado y expuestas a un proceso de corrosión acelerada de sus armaduras, realizándose los análisis en función de diferentes relaciones recubrimiento / diámetro de las armaduras y de los tratamientos previos realizados.

6.5.2 TRABAJO EXPERIMENTAL

6.5.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS

Las vigas analizadas, tienen las características, dimensiones y recubrimientos mencionados en los incisos anteriores de este capítulo. Con el objetivo de comparar el comportamiento de las vigas de acuerdo al tipo de hormigón y recubrimiento con el que fueron elaboradas, se empleó la nomenclatura que se muestra en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Características de las vigas ensayadas.

Elemento	Nombre	Características	Recubrimiento
Viga 1	R ₁₀	50 % agregado grueso reciclado sin tratamiento previo.	10 mm
Viga 2	R ₁₅	50 % agregado grueso reciclado sin tratamiento previo.	15 mm
Viga 3	R ₂₀	50 % agregado grueso reciclado sin tratamiento previo.	20 mm
Viga 4	R ₂₅	50 % agregado grueso reciclado sin tratamiento previo.	25 mm
Viga 5	P	100 % agregado grueso natural	20 mm
Viga 6	L	50 % agregado grueso reciclado con tratamiento previo: lechada de cemento	20 mm
Viga 7	A	50 % agregado grueso reciclado con tratamiento previo: solución con Aditivo A	20 mm
Viga 8	B	50 % agregado grueso reciclado con tratamiento previo: solución con Aditivo B	20 mm

6.5.2.2 MEDICIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES

A los efectos de poder determinar las Frecuencias Naturales de Vibración en las distintas vigas, se procedió a utilizar el método de excitación forzada. Para ello, fue necesario someter a las vigas estudiadas en este trabajo, a un impulso de corta duración de magnitud (I_0), el cual fue aplicado en este caso en el centro de la viga, según muestra la Figura 6.11.

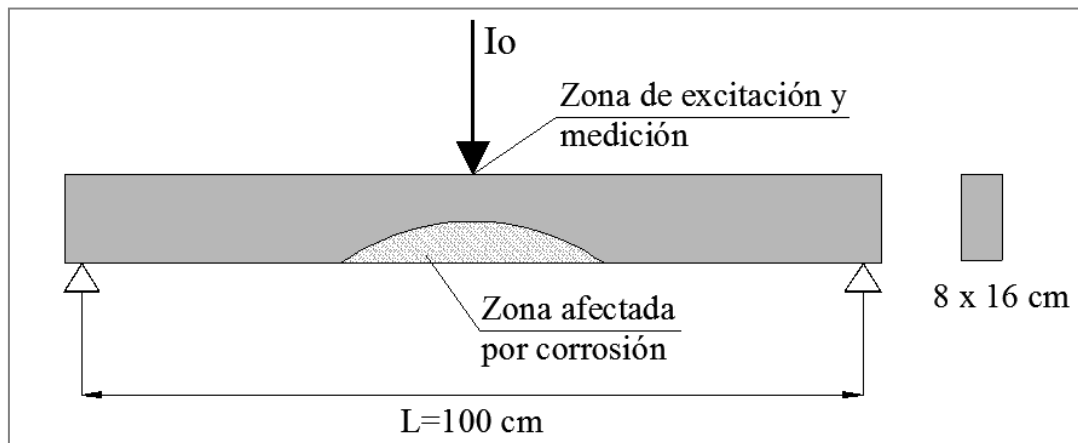


Figura 6.11: Detalle de la viga y ubicación de la zona afectada por la corrosión.

Para analizar el comportamiento dinámico de las vigas, en el momento de aplicación de la excitación externa, fue utilizado como elemento transductor de vibraciones, un acelerómetro piezoeléctrico marca Vernier, modelo LGA-BTA. Es de destacar que este acelerómetro posee unos 45 gramos de peso, de tal manera que su influencia sobre las Frecuencias Naturales de la viga es despreciable.

La señal obtenida del acelerómetro fue procesada por un analizador espectral (FFT) LabQuest, donde se obtuvieron las distintas frecuencias y amplitudes de los modos de excitación de la viga. La Figura 6.12 muestra la disposición de los elementos utilizados en los ensayos.

Los ensayos consistieron en hallar las Frecuencias Naturales correspondiente al primer modo flexional normal de vibración de la viga, mediante el método de excitación forzada, procediéndose tal como se indicara anteriormente.

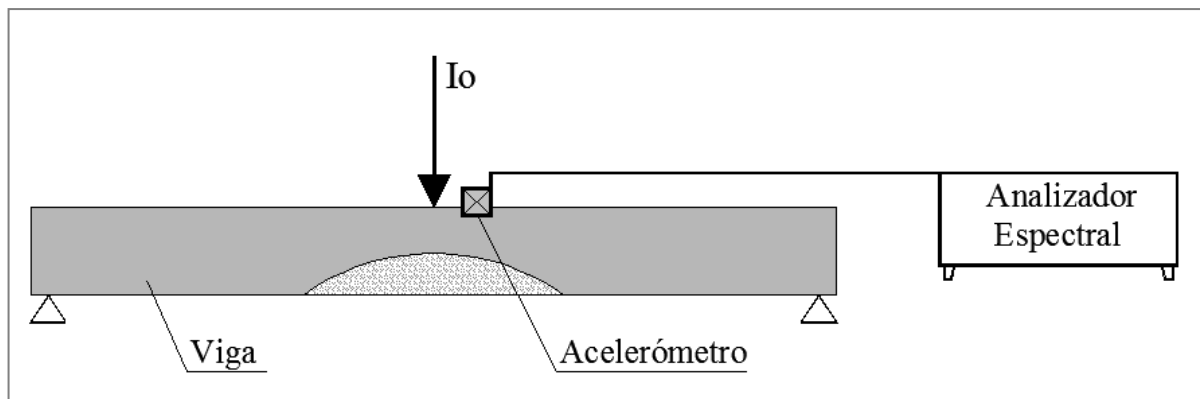


Figura 6.12: Esquema general del instrumental utilizado en el análisis dinámico.

6.5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 6.13 y 6.14 se muestran los gráficos correspondientes a la variación de la Primera Frecuencia Natural de las vigas, con el avance del nivel de corrosión en las armaduras. En el primer caso, se compara el comportamiento dinámico de las vigas elaboradas con hormigón reciclado sin tratamientos previos, con diferentes espesores de recubrimiento de hormigón, y en el segundo caso, se analiza el desarrollo de aquellas vigas elaboradas con distintos tipos de hormigones, manteniendo constante el espesor del recubrimiento de las armaduras en 20 mm.

Como forma de control del orden de magnitud de los valores de las Frecuencias Naturales de Vibración obtenidas experimentalmente, con el uso del acelerómetro, se determinó en forma teórica el valor de las mismas, para vigas simplemente apoyadas, mediante la siguiente ecuación:

$$f_i = \frac{\lambda^2}{2.\pi.L^2} \sqrt{\frac{E.I}{m}} \quad (6.2)$$

donde:

λ : parámetro de Frecuencia: $\lambda^2 = \pi$ (primer modo de vibración)

L = Longitud de la viga (m)

E = Módulo de Elasticidad (Kg/m^2)

I = Momento de inercia de la sección de la viga (m^4)

m = Masa por metro de longitud de la viga (kg.s^2)

Para las vigas analizadas en este trabajo, la primera Frecuencia Natural teórica es: $f_1 = 176$ Hz, considerando un $E = 20.590$ MPa (21 kg/m^2).

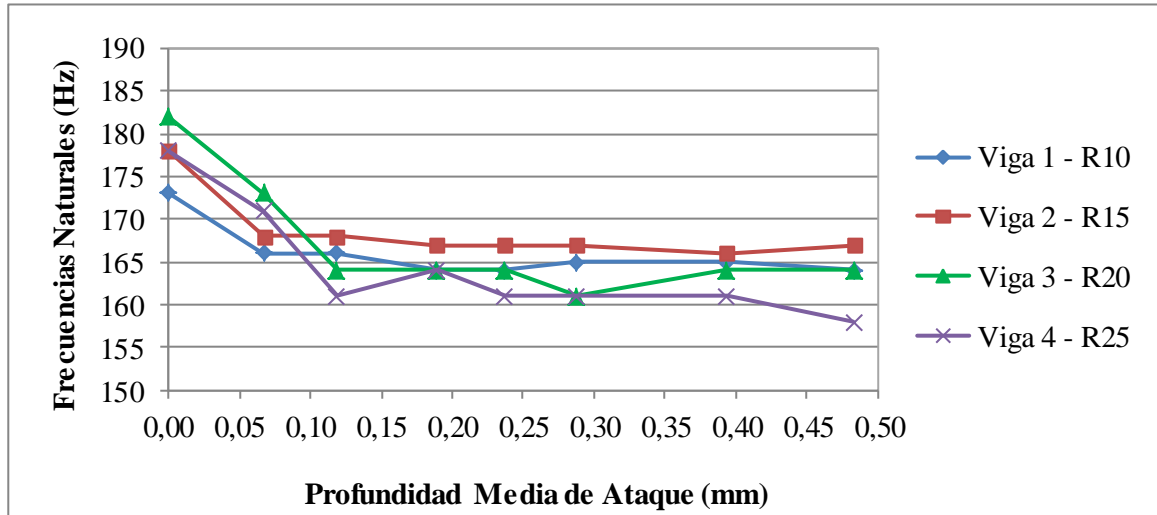


Figura 6.13: Variación de la Primer Frecuencia Natural de Vibración en función de la Profundidad Media del Ataque a las Armaduras para las Vigas 1 a 5.

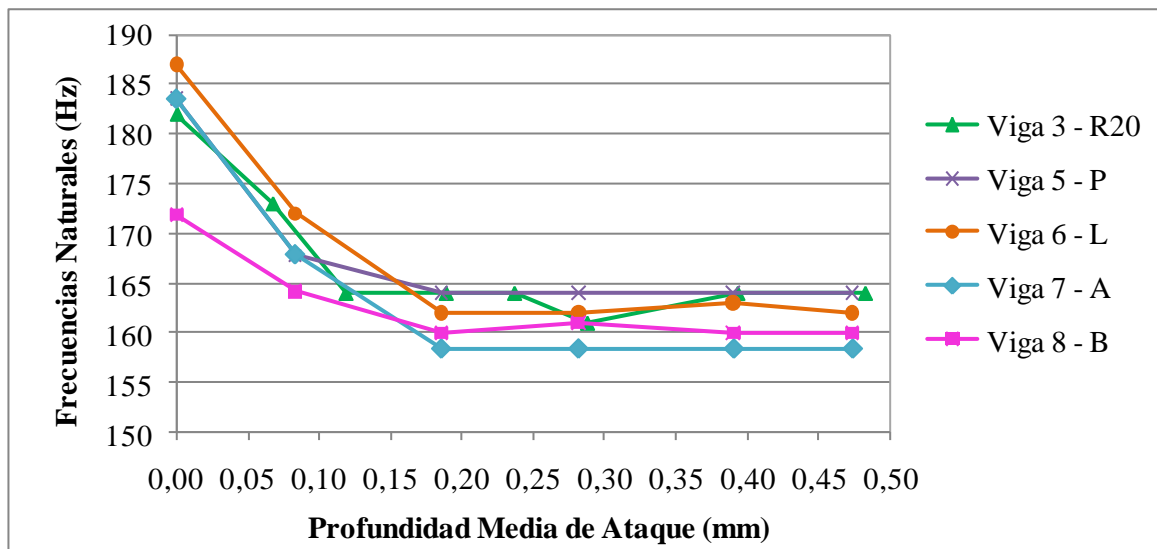


Figura 6.14: Variación de la Primer Frecuencia Natural de Vibración en función de la Profundidad Media del Ataque a las Armaduras, en vigas elaboradas con diferentes tipos de hormigón.

En la Tabla 6.12 se resumen los principales resultados obtenidos en el análisis de las vigas ensayadas.

Tabla 6.12: Resumen de las Frecuencias Naturales y Áreas de Fisuración de las vigas al final del ensayo.

Denominación Viga	1er Modo de Frecuencias Naturales (Hz)		Área Fisuración Final (mm ²)	Ancho Máximo de Fisuras Final (mm)
	Inicial	Reducción		
R ₁₀	173	9	744	0,8
R ₁₅	157	11	766	0,8
R ₂₀	179	18	762	1,0
R ₂₅	188	20	764	0,9
P	184	20	1080	1,2
L	187	25	1007	1,3
A	183	25	957	1,2
B	172	12	713	0,9

En primera instancia, se puede apreciar que no existe una gran sensibilidad de las Primeras Frecuencias Naturales ante las variaciones de las Áreas de Fisuración, esto se debe a que la profundidad de estas fisuras no suele ser mayor que el espesor del recubrimiento, al menos con las profundidades de corrosión de las barras que se trabajó en este ensayo. Esto sugiere que la pérdida de rigidez está mayormente relacionada con la pérdida de sección útil de las armaduras y sólo con las fisuras del recubrimiento, que aparecen sobre las caras laterales de las vigas. Cabe aclarar que estas fisuras aparecen antes del desprendimiento del recubrimiento, mientras que las fisuras por corrosión suelen aparecer sobre la cara horizontal, donde se coloca el contraelectrodo metálico.

Cabe aclarar que las Frecuencias Naturales correspondientes al segundo modo de vibración, prácticamente no variaron, esto se debe a que la zona que fue afectada por la corrosión, es la central de la viga y es donde se encuentra el nodo que no presenta desplazamientos, en el segundo modo de vibración de estas vigas. No fue posible determinar las frecuencias superiores a la Segunda, debido a que estaban enmascaradas con ruidos de fondo.

Analizando las Figuras 6.13 y 6.14, se puede ver que todas las vigas presentan una disminución de su primer Frecuencia Natural, y que la misma es más acentuada al comienzo de la fisuración que al final del ensayo. Esto puede relacionarse con el crecimiento del Área de Fisuración, que a medida que avanza la profundidad media del ataque a las armaduras, se desacelera. Esta forma de variación de las frecuencias no se corresponde con los resultados obtenidos en otros estudios realizados en esta universidad [23], en donde la tasa de

disminución de la primer Frecuencia Natural, fue menor que en este caso, para la misma profundidad media de ataque a las armaduras. Esto se debe a que las áreas de fisuración en el trabajo [23], fueron del orden de la mitad de las registradas en la presente investigación.

La forma en que varían las Primeras Frecuencias Naturales, mostrando una fuerte caída en el primer mes de ensayo, para luego continuar esta disminución a una tasa muy baja, indican que en ese primer mes, se perdió una gran parte de la adherencia entre el hormigón y la armadura. Esta inferencia se ve corroborada por los anchos de fisura máximos medidos, que estuvieron en el orden de 0.30 mm al mes de ensayo, tal que, según [6] con este ancho de fisuras, se perdió aproximadamente un 80 % de la tensión de adherencia entre las armadura y el hormigón.

La disminución de las Primeras Frecuencias Naturales para las vigas que presentan menor relación recubrimiento / diámetro, es inferior que para las restantes. Esto se debe a que la pérdida de rigidez, como consecuencia de la disminución de la sección útil, producida por las fisuras laterales, es menor en aquellas vigas con recubrimientos más reducidos.

También se observa que en la mayoría de los casos, la merma de la Primer Frecuencia Natural, es mayor en aquellas vigas que presentan valores más elevados de Área de Fisuración. Pero es válido aclarar que esta variación también depende del modo de fisuración, como es en el caso de las vigas 3 y 7, donde las cuales, presentan el mismo espesor de recubrimiento de sus armaduras y un comportamiento mecánico y de fisuración similares, pero sin embargo, la disminución de las Primeras Frecuencia Natural es más significativo en el segundo caso. Esto se debe a que la viga 7 presentaba un alto porcentaje de sus fisuras, respecto a la viga 3, en la cara superior de la misma, lo cual implica que su pérdida de rigidez es inferior. Analizando sólo las fisuras en las caras laterales, se observó que la viga 7, poseía aproximadamente un 30 % menos de Área de Fisuración que la viga 3.

6.6 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que se está realizando un estudio con un material, como es el caso del hormigón elaborado con un reemplazo parcial del agregado grueso natural por hormigón triturado, cuya respuesta ante procesos de corrosión está muy poco estudiada aún, este tipo de



análisis es de gran importancia para comenzar a conocer el comportamiento de estos nuevos materiales, sobre todo, en lo relacionado a su durabilidad.

La elevada absorción capilar del hormigón reciclado sin que haya tenido un tratamiento previo, demuestra que el mismo presenta una estructura de poros más abierta que un hormigón tradicional, aun siendo elaborado con la misma relación agua / cemento. Esto fue corroborado con el tiempo registrado para la aparición de las primeras fisuras visibles en un proceso de corrosión acelerado, las cuales se producen con anterioridad que para los hormigones elaborados en forma convencional.

En las vigas de mayor r/ϕ , la aparición de las primeras fisuras visibles, demoró más que en aquellas de menor r/ϕ , con esto se puede afirmar que el incremento del espesor del recubrimiento de una estructura de hormigón, no sólo hace que tarden más tiempo en llegar a las armaduras los elementos agresivos desde el exterior (cloruros, oxígeno, agua), sino que una vez despasivado tarda más en aparecer las primeras fisuras y la evolución de las mismas es más lenta.

Como se observó en el Capítulo 5, los hormigones efectuados con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado de hormigón, al cual se le aplicaron los tratamientos previos de lechada de cemento y solución con el Aditivo A, mostraron una clara reducción de su estructura de poros, respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, presentando un comportamiento mecánico y de absorción capilar similar al hormigón patrón, realizado sin utilización de un agregado reciclado.

Por otro lado, el comportamiento frente al proceso de corrosión de las armaduras que presentaron las vigas 3 y 4 (tratamiento previo del agregado reciclado con lechada de cemento y solución con Aditivo A respectivamente) fue muy similar al que se desarrolló en la viga 1 (elaborada con hormigón convencional), mostrando una activación más lenta de sus armaduras, y un mayor ancho máximo de fisuras y área de fisuración que las vigas elaboradas con hormigones reciclados sin tratamientos previos y con el tratamiento previo realizado con la solución con Aditivo B, los cuales presentaban una estructura de poros más abierta.

La disminución de la Primer Frecuencia Natural de las vigas sometidas a un proceso de corrosión, alcanzó magnitudes detectables, con los instrumentos de medición utilizados,

queda claro que la evaluación del daño por corrosión, mediante el análisis de la variación de las Frecuencias Naturales del elemento estructural afectado, es una adecuada y útil alternativa de ensayo no destructivo, para evaluar el estado de integridad estructural de la misma.

La realización de tratamientos previos al agregado grueso reciclado, tiene una clara influencia en la estructura de poros del hormigón obtenido, alterando el comportamiento de las vigas elaboradas con dicho hormigón, frente al proceso de corrosión y modificando su respuesta dinámica.

6.7 REFERENCIAS

- [1] Alonso M.C., Andrade M.C., Rodríguez J., García M., "Cover cracking and amount of rebar corrosion: Importance of the current applied in accelerated test.", IV^o Congress on concrete in the service mankind, Concrete, repair, rehabilitation and protection; Dundee, U.K., 1996.
- [2] Al-Sulaimani J., Kaleemullah M., Basunbul I.A., Rasheeduzafar S., "Influence on corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members.", ACI Structural Journal, 1990, 220-231.
- [3] Andrade M.C., Alonso M.C., Molina F.J., "Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – Experimental test.", Materials and Structures, 26, 1993, 453-464.
- [4] Ortega N.F., Alonso M.C., Andrade M.C., López C., "Análisis de la fisuración ocasionada por la corrosión de las armaduras activas de elementos pretensados", Coloquia 2001, Madrid, 2001.
- [5] Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Vidal M.A., "Disminución de la adherencia entre hormigón y barras corrugadas debido a la corrosión.", Hormigón y Acero, 189, 1993, 49-65.
- [6] Almusallam A.A., Al-Gahtani A.S., Rauf Aziz A., Rasheeduzafar S., "Effect of reinforcement corrosion on bond strength.", Construction and Building Materials, 10, 2, 1996, 123-129.
- [7] Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Diez J.M., "Comportamiento estructural de vigas de hormigón con armaduras corroídas.", Hormigón y Acero, 200, 1996, 113-131.5.
- [8] Rodríguez J., Ortega L.M., Casal J., Diez J.M., "La corrosión de armaduras y la vida residual de las estructuras de hormigón.", Hormigón y Acero, 208, 1998, 63-78.
- [9] Melchers R., "Assessment of existing structures, approaches and research needs.", Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 406-411.
- [10] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales – Instituto Argentino de Siderurgia, "Norma U 500-528: Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón", Buenos Aires, 1989.
- [11] Rodríguez J., Ortega L.M., García A.M., "Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón, mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka EU-401.", Hormigón y Acero, 189, 1993, 79-91.3.
- [12] Alonso C., Andrade C., Rodríguez J., Diez J.M., "Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion.", Materials and Structures / Matériaux et Constructions, 31, 1998, 435-441.4
- [13] Acosta A.T., Sague A., "Concrete cover cracking and corrosion expansion of embedded reinforces steel.", 3rd. NACE Latin American Corrosion Congress, Cancún, (1998), 1-15.



- [14] American Society for Testing and Materials, ASTM C876, “Standard Test Method for Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete”, Philadelphia, U.S.A., 1980.
- [15] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1627: Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón”, Buenos Aires, 1997.
- [16] CIRSOC, Reglamento 201, “Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado”, 2, 2002, Buenos Aires.
- [17] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1871: Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido”, Buenos Aires, 2005.
- [18] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1546: Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión.”, Buenos Aires, 1992.
- [19] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1658: Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral.”, Buenos Aires, 1995.
- [20] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1534: Hormigón de cemento portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio.”, Buenos Aires, 1985.
- [21] American Society for Testing and Materials, ASTM G1-90, “Recommended practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens.”, Philadelphia, U.S.A., 1990.
- [22] Aveldaño R.R., Ortega N.F., “Influence of Reinforcement Distribution in the Corrosive Process of Reinforced Concrete Beams.”, Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, ISSN 0024-9831, 2009, 61.
- [23] Ortega N.F., Cortínez V.H., La Malfa S., Schierloh M.I., “Análisis dinámico de vigas de hormigón armado, afectadas por la corrosión de sus armaduras.”, XVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Rosario, 2002, 14.

CAPÍTULO 7

TRATAMIENTOS PREVIOS CON MEJOR DESEMPEÑO



CAPÍTULO 7

TRATAMIENTOS PREVIOS CON MEJOR DESEMPEÑO

7.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En el proceso de investigación llevado a cabo en los capítulos anteriores, se obtuvieron resultados y se sacaron conclusiones acerca de los diferentes tratamientos previos, incluyendo en dicho análisis, su desempeño, aplicabilidad y costos comparativos. Pudo determinarse que, si bien los tratamientos no simultáneos al mezclado, son alternativas efectivas, brindando un aporte interesante para futuras investigaciones, los tratamientos simultáneos al mezclado presentan una gran ventaja comparativa, por la facilidad de aplicación, lo que implica una incidencia baja o nula en los costos de ejecución y, obviamente, por su buen desempeño.

Como se mencionó en el Capítulo 5, las variantes que se utilizaron para la realización del tratamiento previo simultáneo con el mezclado, se basan en realizar dos etapas de mezclado, en la primera de ellas, se coloca el agregado reciclado con una parte del cemento y del agua total de la dosificación, para luego, en una segunda etapa, continuar el mezclado con los demás agregados (arena y agregado grueso natural), cemento y agua restantes. En todos los casos se emplearon hormigones elaborados con una relación agua / cemento de 0,5 y con un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por hormigón triturado y se plantearon alternativas diferentes de mezclado, variando el porcentaje de cemento utilizado en la primera etapa, que cubre superficialmente al agregado reciclado y la relación agua/cemento de la misma.

En este capítulo se busca ampliar las variables, utilizando, por sus ventajas comparativas con el resto de los tratamientos, el tratamiento previo simultáneo al mezclado de materiales, para la fabricación de hormigones reciclados con distintos porcentajes de reemplazo del agregado grueso natural por agregado reciclado y de esta forma poder analizar la efectividad que el tratamiento utilizado tiene, sobre las propiedades de estos hormigones.

Dentro de los diferentes tratamientos simultáneos analizados, se optó por la variante 1 planteada en el Capítulo 5, cuya lechada contaba con una relación agua / cemento de 0,50. Cabe aclarar, que la elección de esta variante no solo se basó en su desempeño, que fue

similar al de las otras variantes, también se tuvo en cuenta la cantidad de agua y cemento ingresados en la primer etapa, considerando que a medida que aumenta el reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, el volumen de lechada debe ser mayor, para que el tratamiento pueda abarcar todo el material a tratar. Por esta razón, las variantes 2 a 4, para porcentajes de reemplazo elevados, necesitaban incorporar en la primera etapa la mayor parte o la totalidad del agua y el cemento de la dosificación.

Por otro lado, para dar cierre a la investigación, se buscó analizar el comportamiento ante un proceso de corrosión, de elementos de hormigón armado, fabricados en las condiciones antes mencionadas.

7.2 TRABAJO EXPERIMENTAL

7.2.1 MATERIALES Y MEZCLAS

Se dosificaron cinco hormigones con relación agua / cemento de 0,50, de los cuales, uno de ellos se realizó sin la utilización de agregado reciclado, y los cuatro restantes, con distintitos porcentajes de reemplazo (25 %, 50 %, 75 % y 100 %), en volumen, de agregado grueso natural (canto rodado) por agregado reciclado. En todos los casos que se utilizó agregado reciclado, el mismo fue sometido a un tratamiento simultáneo al mezclado de materiales.

Los materiales utilizados en las mezclas fueron los siguientes:

Agua: se empleó agua corriente tomada de la red de provisión a la ciudad de Bahía Blanca.

Cemento: se usó cemento pórtland normal (CPN 40), proveniente de una fábrica ubicada en la Provincia de Buenos Aires.

Agregado Fino: constituido por arena natural silíceas, extraída de un yacimiento ubicado en la zona rural del partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, que cumple con las especificaciones de calidad dadas por la Norma IRAM 1627 [1].

Agregados gruesos, se emplearon tres tipos:

- a) Natural: constituido por canto rodado, cuyo Tamaño Máximo Nominal es de 25 mm. Este agregado cumple con los límites granulométricos indicados en la Norma IRAM 1627 [1], y proviene de la misma cantera que el agregado fino.

- b) Reciclado: El hormigón a reciclar se obtuvo de la rotura de elementos de hormigón elaborado con canto rodado, proveniente de distintas obras realizadas en la zona. Se molió el material a reciclar con el empleo de una trituradora de mandíbulas. El Tamaño Máximo Nominal del material resultante fue de 25 mm.
- c) Reciclado con tratamiento previo: el material mencionado en el inciso b), fue sometido a un tratamiento con lechada de cemento en forma simultánea al mezclado de materiales. Con el objetivo de comparar el comportamiento de los diferentes hormigones proyectados, se los denominó como se muestra en la Tabla 5.19.

Tabla 7.1: Denominación hormigones proyectados

Denominación	Características
P	100 % Agregado grueso natural
RT-25	25 % Agrega grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo
RT-50	50 % Agrega grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo
RT-75	75 % Agrega grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo
RT-100	100 % Agrega grueso reciclado con tratamiento previo simultáneo

Las dosificaciones de los hormigones de referencia mencionados anteriormente (P y RT) están detalladas en la Tabla 7.2 y corresponden a lo indicado en la Tabla 7.1.

Tabla 7.2: Proporciones de la serie de mezclas realizadas con $a/c = 0,50$

Mezcla	P	RT-25	RT-50	RT-75	RT-100
Cemento ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$)	350	350	350	350	350
Canto Rodado ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$)	930	697	467	233	-
Agr. Reciclado ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$)	-	222	443	665	886
Agr. Fino ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$)	895	895	895	895	895

Los hormigones se diseñaron con un rango de consistencia de 8-10 cm, medida con el Cono de Abrams (IRAM 1536) [2]. Todas las muestras presentaron un grado de trabajabilidad aceptable, sin observarse indicios de segregación ni exudación.

La carga de los materiales en la hormigonera, donde se elaboraron las mezclas RT-25, RT-50, RT-75 y RT-100, se realizó en dos etapas, las dosificaciones en cada etapa se detallan en la

Tabla 7.3. En esta tabla se puede apreciar que se varió en la misma proporción, la cantidad de agua incorporada en la primera etapa y el porcentaje de agregado reciclado a tratar en la misma.

Tabla 7.3: Etapas de mezclado en los tratamientos previos

Mezcla	Relación a/c lechada	Etapa	
		Primera	Segunda
RT-25			
Agua (l/m ³ H°)	0,50	21,9	153,1
Cemento (kg/m ³ H°)		43,8	306,2
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	697
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		222	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
RT-50		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	0,50	43,8	131,2
Cemento (kg/m ³ H°)		87,6	262,4
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	465
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		443	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
RT-75		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	0,50	54,8	120,25
Cemento (kg/m ³ H°)		109,5	240,5
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	233
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		665	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895
RT-100		Primera	Segunda
Agua (l/m ³ H°)	0,50	87,5	87,5
Cemento (kg/m ³ H°)		175	175
Canto Rodado (kg/m ³ H°)		0	0
Agr. Reciclado (kg/m ³ H°)		886	0
Agr. Fino (kg/m ³ H°)		0	895

7.2.2 ELABORACIÓN DE MUESTRAS

Con los hormigones descriptos anteriormente se elaboraron las siguientes muestras:

- a) Vigas de hormigón armado, de dimensiones: 8 x 16 x 110 cm, armadas con barras de acero de dureza natural (ADN 420, IRAM-IAS U 500-528) [3], de diámetro nominal 4,2 mm y estribos de acero liso, de diámetro 2,1 mm, con un recubrimiento de 20 mm. Estas, fueron usadas en los ensayos de corrosión acelerada. El llenado de los moldes se hizo en dos capas, compactándose mediante el uso de un vibrador y el curado se realizó en ambiente húmedo, durante veintiocho días en laboratorio, con las siguientes condiciones ambientales: 20 ± 2 °C y HR \approx 50 %.
- b) Probetas cilíndricas de hormigón (15 x 30 cm), empleadas en los ensayos físicos de capacidad y velocidad de succión capilar (IRAM 1871) [4] y mecánicos: resistencia a compresión (IRAM 1546) [5] y a tracción indirecta (IRAM 1658) [6]. Se moldearon y curaron de acuerdo con la normativa vigente en nuestro país (IRAM 1534) [7].

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las vigas de acuerdo al tipo de hormigón con el que fueron elaboradas, se las denominó como se muestra en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Tipo de hormigón de cada vigas.

Elemento	Tipo de Hormigón
Viga 1	P
Viga 2	RT-25
Viga 3	RT-50
Viga 4	RT-75
Viga 5	RT-100

7.2.3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La aplicación del método acelerado de corrosión sobre las vigas, que se realizó de acuerdo a lo explicado en 6.1.2.1, y el seguimiento electroquímico y la medición de fisuración se ejecutaron de acuerdo a lo especificado en 6.1.2.2.

7.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.3.1 CARACTERIZACIÓN

En la Tabla 7.5 se detallan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados. Los valores expuestos, son el promedio de tres determinaciones con una dispersión entre resultados menor al 15 % del promedio [8].

Tabla 7.5: Características mecánicas de los hormigones empleados.

Hormigón	Compresión [MPa]	Tracción Indirecta [MPa]
P	32,4	3,2
RT-25	31,2	3,1
RT-50	33,3	3,3
RT-75	31,6	3,1
RT-100	31,9	3,2

En la Figura 7.1, se observa la evolución del ensayo de absorción capilar, correspondiente a cada hormigón realizado y descrito anteriormente realizado

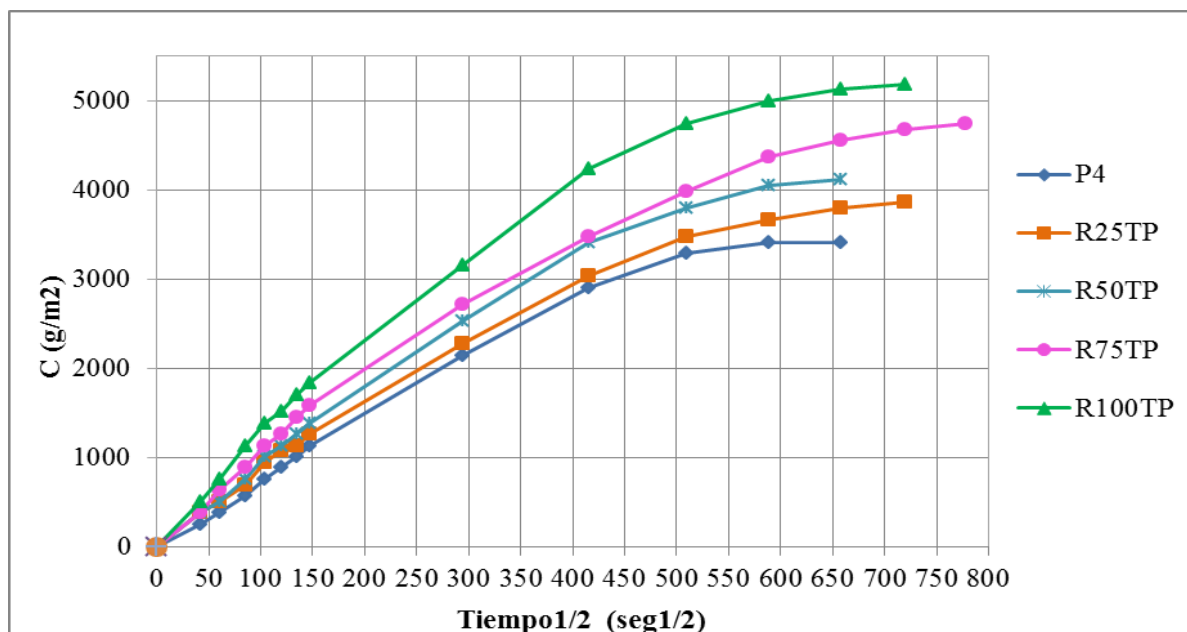


Figura 7.1: Ensayo de absorción capilar de los distintos hormigones estudiados.

En la Tabla 7.6 se muestran los valores de Capacidad de Succión Capilar (C) y de Velocidad de Succión Capilar (V), que se determinaron en el ensayo de absorción capilar de todos los hormigones elaborados. Además se incorpora una comparación porcentual de dichos valores, para todos los hormigones empleados.

Tabla 7.6: Capacidad (C) y velocidad de succión capilar (V) de los distintos hormigones estudiados

Hormigón	C [g/m ²]	C [%]	V [g/m ² s ^{1/2}]	V [%]
P	3418	100	7,09	100
RT-25	3861	113	7,02	99
RT-50	4114	120	8,02	113
RT-75	4747	139	7,41	105
RT-100	5190	152	9,47	134

En la Tabla 7.7 se muestran los valores obtenidos del ensayo de Resistividad Eléctica [ρ] y una comparación porcentual de los mismos, tomando como referencia, los valores obtenidos para el hormigón patrón, sin agregado reciclado (P).

Tabla 7.7: Resistividad Eléctrica (ρ) de los distintos hormigones elaborados

PROBETA	ρ [Ω .m]	ρ [%]
P	63	100
RT-25	62	98
RT-50	58	92
RT-75	53	84
RT-100	51	81

Los resultados de resistencia a compresión del hormigón indican que, para cualquier porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, el cual fue sometido a un tratamiento de lechada de cemento, simultáneo al mezclado de materiales, se obtiene un material de buena prestación, como para ser utilizado en estructuras resistentes. Se observó

una leve disminución en aquellos hormigones en los cuales el reemplazo fue mayor (75 % y 100 %).

Por otra parte, en la Figura 7.1 y en las Tablas 7.6 y 7.7, los valores de absorción capilar mostraron un incremento a medida que aumenta el reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, mientras que los valores de resistividad disminuyeron ante esta variación. Esto se debe al hecho de que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad. Sin embargo, la variación porcentual de absorción capilar y de resistividad respecto al hormigón patrón (P), aún para los hormigones con mayor porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado (RT-75 % y RT-100 %), fueron inferiores a los obtenidos en el Capítulo 5, para un hormigón con un 50 % de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, pero en este último caso sin la realización de ningún tratamiento previo.

7.3.2 POTENCIALES DE CORROSIÓN

En la Figura 7.2 se muestra un promedio de determinaciones realizadas en 5 puntos, donde se midieron los potenciales de corrosión en la zona central afectada de las 5 vigas.

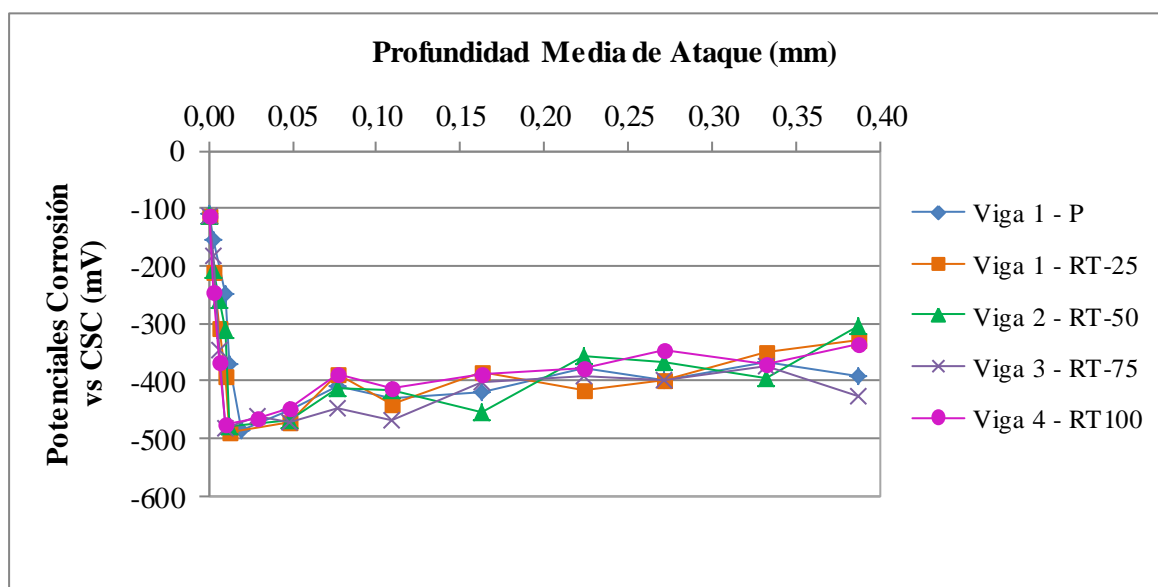


Figura 7.2: Potenciales de corrosión en función de la Prof. Media de Ataque a las Armaduras.

El comportamiento electroquímico analizado en las 5 vigas, a través del seguimiento de sus Potenciales de Corrosión, no mostró diferencias muy notables. Solamente en el inicio del

período en estudio, de activación o despasivación de las armaduras, se notó una diferencia entre las distintas vigas, siendo las vigas fabricadas con hormigones con mayor porcentaje de reemplazo de agregado reciclado, las que mostraron sus picos de potencial con anterioridad a las restantes, siempre dentro del rango de valores de potenciales entre 0 y -550 mV. Posteriormente, se encontró un proceso de pseudo-pasivación y generalización de la fisuración, que fue similar en todas las vigas de este ensayo.

Como se mencionó anteriormente, los valores de absorción capilar se incrementaron a medida que el reemplazo de agregado natural por agregado reciclado también lo hacía. Por lo tanto, los hormigones con mayores porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, cuentan con una estructura de poros más abierta que las restantes permitiendo un paso más rápido de humectación y oxígeno hacia las armaduras, activando antes, el proceso de corrosión.

7.3.3 FISURACIÓN

En la Figura 7.3 se muestra la variación del Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media del Ataque sobre las barras metálicas, determinada en forma teórica con la Ley de Faraday, (Ecuación 6.1).

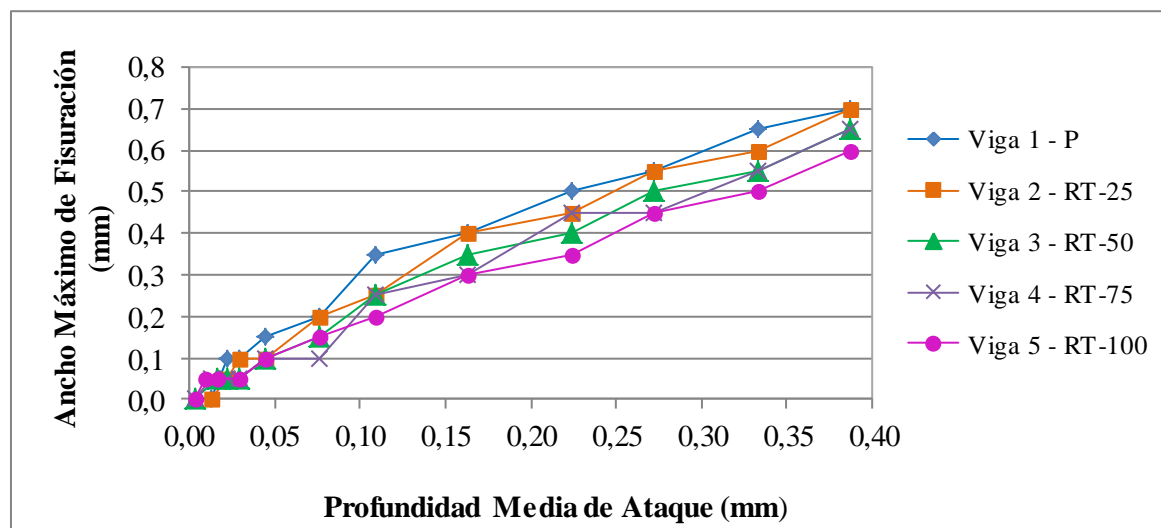


Figura 7.3: Ancho Máximo de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras.

Se pudo observar que los Anchos Máximos de Fisuración, durante la primer etapa del ensayo, son similares en todas las vigas, pero a partir de una Profundidad Media de Ataque de las armaduras de unos 0,10 mm, comienzan a diferenciarse con mayor claridad, los mayores

anchos de fisuras y el crecimiento más acelerado de los mismos, se registró en la viga patrón, disminuyendo a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado.

En la Figura 7.4 se aprecia el avance del Área de Fisuración de cada viga, en función de la Profundidad Media del Ataque sobre las barras metálicas, determinada en forma teórica con la Ley de Faraday.

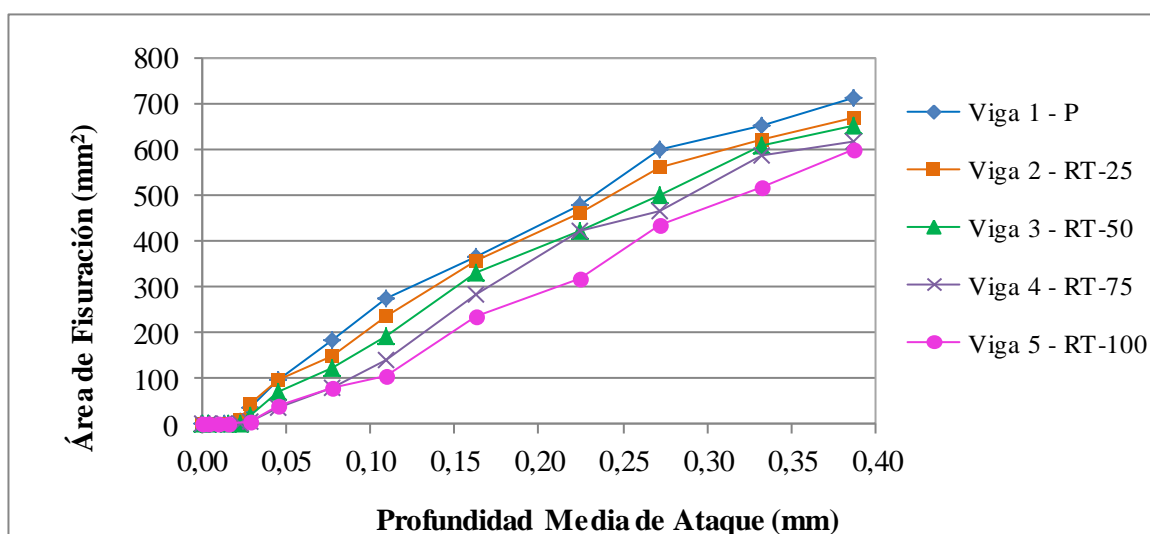


Figura 7.4: Área de Fisuración, en función de la Profundidad Media de Ataque a las armaduras.

Sintetizando la información contenida en las Figuras 7.3 y 7.4, en las Tablas 7.8 y 7.9, se exponen las tendencias que resultan de aproximar la variación tanto de las Áreas de Fisuración como de los Anchos Máximos de Fisuras en el Tiempo, a leyes lineales, obteniéndose buenos ajustes, con Índices de Correlación bastante buenos.

Tabla 7.8: Variación de los Anchos Máximos de Fisuras (y), respecto del Tiempo del proceso (x)

Viga	Ley	Índice de Correlación
P	$y = 1,7777x + 0,0659$	$R^2 = 0,961$
RT-25	$y = 1,7978x + 0,0356$	$R^2 = 0,977$
RT-50	$y = 1,6699x + 0,0245$	$R^2 = 0,985$
RT-75	$y = 1,6644x + 0,0174$	$R^2 = 0,981$
RT-100	$y = 1,4939x + 0,0258$	$R^2 = 0,992$

Tabla 7.9: Variación de las Áreas de Fisuración (y), respecto del Tiempo del proceso (x)

Viga	Ley	Índice de Correlación
P	$y = 2008,7x + 3,8307$	$R^2 = 0,981$
RT-25	$y = 1901,6x + 2,1516$	$R^2 = 0,984$
RT-50	$y = 1843,2x - 11,888$	$R^2 = 0,991$
RT-75	$y = 1782,0x - 25,927$	$R^2 = 0,987$
RT-100	$y = 1614,7x - 26,537$	$R^2 = 0,991$

En el seguimiento de la fisuración no se aprecian grandes diferencias en la aparición de las primeras fisuras visibles. Con respecto a las Áreas de Fisuración Totales, los Anchos Máximos de Fisura y sus correspondientes pendientes observadas en el Análisis de regresión, resultaron superiores en la viga patrón, reduciéndose estos valores a medida que el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado aumentaba.

La evolución de la fisuración observado en todas las vigas, está claramente relacionada con los valores de absorción capilar y resistividad que mostraron los hormigones con los que las mismas fueron elaboradas, interpretándose que, aquellos hormigones con menor porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado presentan una estructura de poros más cerrada, y por este motivo, el inicio del proceso de corrosión de las armaduras es más lento, pero una vez que se inicia, los productos generados por el mismo, cuentan con menor espacio para alojarse, generando mayores tensiones en el hormigón circundante, y por lo tanto, aparece una mayor fisuración.

En el Apéndice F se pueden observar fotografías de las vigas fisuradas una vez terminado en ensayo de corrosión acelerada.

7.3.4 RESULTADOS GRAVIMÉTRICOS

Completando el estudio anterior, se picó el hormigón adyacente a las armaduras en la zona afectada por la corrosión, para visualizar el estado de las mismas, realizando un relevamiento de las zonas afectadas por la corrosión, y otro de las picaduras encontradas. Posteriormente se afectó la gravimetría de las barras, de acuerdo a la Norma ASTM G1-90 [9], cuyos resultados se exponen en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10: Pérdidas gravimétricas en las armaduras

Viga	Barra afectada		Pérdidas (g)		Pérdidas (%)
			Parciales	Total	
Viga 1 P	Cordón superior	izquierda	19,1	47,75	25,10
		derecha	18,5		24,31
	Cordón inferior	Izquierda	1,3		1,71
		Derecha	0,15		0,20
	Estribos		8,7		19,12
Viga 2 RT-25	Cordón superior	izquierda	19,5	47,71	25,62
		derecha	19,06		25,04
	Cordón inferior	Izquierda	0,4		0,53
		Derecha	0,8		1,05
	Estribos		7,95		17,47
Viga 3 RT-50	Cordón superior	izquierda	18,95	47,14	24,90
		derecha	19,20		25,23
	Cordón inferior	Izquierda	0,30		0,00
		Derecha	0,75		0,99
	Estribos		8,24		18,11
Viga 4 RT-75	Cordón superior	izquierda	19,25	47,64	25,29
		derecha	18,89		24,82
	Cordón inferior	Izquierda	0,62		0,81
		Derecha	0,83		1,09
	Estribos		8,05		17,69
Viga 5 RT-100	Cordón superior	izquierda	19,02	47,01	24,99
		derecha	18,76		24,65
	Cordón inferior	Izquierda	1,03		1,35
		Derecha	0,00		0,00
	Estribos		8,2		18,02

Cabe acotar que un esquema de la zona de armadura afectada por la corrosión, en cada caso, puede verse en el Apéndice F.

De la inspección visual de las armaduras descubiertas y de los resultados obtenidos en la gravimetría, pueden realizarse algunas observaciones generales:

- a) Debido a la acción de los Cloruros (a pesar de la baja concentración adoptada), la corrosión sobre las barras no fue solamente generalizada, sino que se observaron zonas de corrosión localizada (picaduras).
- b) El ataque de corrosión a las barras no se limitó a las barras superiores y parte superior de los estribos (como fue la hipótesis inicial de trabajo), sino que se vieron afectados algunos estribos en casi en su totalidad y también las barras inferiores (aunque con menor profundidad de ataque y con una corrosión uniforme)
- c) La pérdida total de material, aún en las barras más afectadas, no es un indicador concluyente de la peligrosidad del fenómeno, ya que por la presencia de cloruros, no se tuvo corrosión uniforme. Debido a las picaduras, en determinadas secciones, los diámetros disminuyeron hasta llegar a cortarse la barra, en algunos casos se debilitó la sección de acero resistente a más del 50%.
- d) Las fisuras del recubrimiento más anchas, se produjeron, en general, en concordancia con las barras que presentaron la mayor pérdida de material. Aunque no existió una correlación directa entre la ubicación de las mayores picaduras y la de los Anchos Máximos de Fisura.

7.4 CONCLUSIONES

Los resultados de resistencia a compresión del hormigón indican que, para cualquier porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, el cual fue sometido a un tratamiento de lechada de cemento, simultáneo al mezclado de materiales, se obtiene un material de buena prestación, como para ser utilizado en estructuras resistentes. Se observó una leve disminución en aquellos hormigones en los cuales el reemplazo fue mayor (75 % y 100 %)

Los valores de absorción capilar mostraron un incremento a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, mientras que los valores de resistividad disminuyeron ante esta variación. Esto se debe al hecho de que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad.

Es importante destacar que la variación porcentual de absorción capilar y de resistividad respecto al hormigón patrón (P), aún para los hormigones con mayor porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado (RT-75 % y RT-100 %), fueron inferiores a los obtenidos en hormigones con un 50 % de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado, pero sin la realización de ningún tratamiento previo (Capítulo 5).

Las Áreas de Fisuración Totales, los Anchos Máximos de Fisura y su velocidad de crecimiento, resultaron superiores en la viga patrón, reduciéndose estos valores a medida que el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado aumentaba.

Los hormigones con menor porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado presentan una estructura de poros más cerrada, y por este motivo, el inicio del proceso de corrosión de las armaduras es más lento, pero una vez que se inicia, los productos generados por el mismo, cuentan con menor espacio para alojarse, generando mayores tensiones en el hormigón circundante, y por lo tanto, aparece una mayor fisuración.

7.5 REFERENCIAS

- [1] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1627: Agregados. Granulometría de los agregados para hormigón.”, Buenos Aires, 1997.
- [2] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1536: Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.”, Buenos Aires, 1978.
- [3] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales – Instituto Argentino de Siderurgia, “Norma U 500-528: Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructuras de hormigón.” Buenos Aires, 1989.
- [4] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1871: Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido.”, Buenos Aires, 2005.
- [5] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1546: Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión.”, Buenos Aires, 1992.
- [6] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1658: Hormigón. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral.”, Buenos Aires, 1995.
- [7] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1534: Hormigón de cemento portland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio.”, Buenos Aires, 1985.
- [8] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, “1666-3. “Hormigón de cemento portland. Hormigón elaborado. Uniformidad del hormigón del pastón”, Buenos Aires, 1986.
- [9] American Society for Testing and Materials, “ASTM G1-90; Recommended practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens.”, Philadelphia, U.S.A., 1990.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS



CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

8.1 SÍNTESIS

Al presentar las tareas a desarrollar en esta Tesis, planteando como tema general, la utilización de hormigones reciclados, mejoras y comportamiento ante procesos de corrosión de las armaduras, se comenzó con la búsqueda bibliográfica y el estado del arte en la materia. Se pudo así determinar la importante cantidad de variables que intervienen en este análisis, cómo influyen las características de los materiales utilizados (agregado natural, cemento, agua), la procedencia y las características del agregado reciclado, la dosificación y el procedimiento de mezclado de materiales adoptado, las condiciones geométricas (recubrimientos y armaduras utilizadas) impuestas en los elementos estructurales analizados por corrosión, etc.

Con la información obtenida de los trabajos previos, se decidió acotar la cantidad de variables intervinientes en este estudio, efectuando las experiencias con los mismos agregados naturales, el mismo cemento, y agua corriente de red. Asimismo, se empleó en todos los hormigones en los que se aplicaron procesos de corrosión, la misma relación agua / cemento, igual forma de mezclado, (excepto en los casos donde la variable era justamente esa), colado, vibrado y curado del hormigón. De esta manera, se trató de asegurar una dispersión aceptable en los resultados obtenidos, corroborado por los ensayos realizados en cada experimento). Por otra parte, también se mantuvo constante el tipo de acero empleado (en armaduras longitudinales y estribos).

Para la investigación de los diversos aspectos previstos, se emplearon probetas de hormigón armado, de materiales y dimensiones geométricas semejantes a los empleados habitualmente en la práctica. Asimismo, en el armado y fabricación de las mismas, se respetaron las características habituales de obra. Se trató de esta manera, representar en los ensayos de laboratorio, condiciones muy similares a las que ocurren en la realidad.

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

A continuación, se exponen las conclusiones generales a las que se arribó, analizando en forma global, los resultados y conclusiones particulares, expuestos en los anteriores capítulos:

- Es indudable la importancia que tiene el reciclado de materiales de construcción y demolición para el impulso de la sustentabilidad de las construcciones. En particular, el hormigón, es el material más utilizado en la industria de la construcción en el mundo, por lo tanto, desde el punto de vista ambiental es importante analizar la posibilidad de su reciclado.
- En la actualidad, numerosos países han fomentado el reciclado del hormigón de demolición, desarrollando normativas al respecto y realizando construcciones con este material. Sin embargo, cada país, y en particular la Argentina, puede tomar como ejemplo los desarrollos implementados en otros lugares, pero no es posible incorporarlos directamente en las formas y normativas de construcción propias, pues es fundamental considerar y adaptar los mismos, a las particularidades de cada país (materiales utilizados, normativas vigentes, metodologías de construcción, etc.), por este motivo, es importante la realización de investigaciones sobre esta temática en nuestro país.
- Para la implementación del reciclado de hormigón, es fundamental, como sucede en otros países del mundo, aplicar políticas que impulsen esta temática, lo cual trae aparejado consigo, normas y reglamentaciones para su ejecución. En particular, la ciudad de Bahía Blanca, cuenta con volúmenes importantes de hormigón de demolición para poder implementar el reciclado de este material, lo mismo puede suceder en ciudades de similar importancia y otras de mayor tamaño como Buenos Aires, donde ya se está utilizando.
- La presencia de un número importante de vertederos clandestinos en Bahía Blanca, así como en muchas ciudades de Argentina, es una costumbre que, más allá de la complementación o no con el reciclado de materiales, debe tratar de erradicarse. En este aspecto, también existen reglamentaciones en otros países del mundo, destinadas a

solucionar esta problemática, las mismas podrían ser consideradas, como punto de partida en nuestro país.

- Los ensayos no destructivos pueden servir para estimar la calidad de los residuos de hormigón, pero sería más conveniente aplicarlas antes de realizar la demolición, para llevar a cabo una selección previa del material a reciclar, sin que esté afectado (fisurado) por las tareas de demolición. En este aspecto, como se efectúa en algunos países con políticas activas en el reciclado de materiales, es importante destacar la preselección en origen de los materiales desechados.
- Los agregados reciclados de hormigón utilizados en estos estudios, así como se manifestó en numerosas investigaciones realizadas por otros autores, mostraron que, en comparación con el agregado natural, en este caso, canto rodado, la densidad fue inferior (10 %), la absorción de agua experimentó un importante aumento y el desgaste por abrasión (ensayo “Los Ángeles”) fue casi el doble.
- Los resultados experimentales obtenidos con los hormigones reciclados, tanto en los que se realizó un reemplazo del 50 % del agregado grueso natural (en la mayoría de los casos estudiados) por agregado grueso reciclado, como en los que se reemplazó un porcentaje más importante (75 % - 100 %), habiendo o no realizado tratamientos previos sobre el agregado reciclado, se obtuvo un material con buenas prestaciones, pudiendo ser utilizado en estructuras resistentes.
- Los valores de absorción capilar y de resistividad observados en todos los casos en los que no se aplicaron tratamientos previos, se mostraron elevados, respecto a los hormigones elaborados en forma convencional, esto se debe al hecho que los agregados de hormigón triturado poseen una mayor porosidad. Por este motivo, el hormigón elaborado con agregados reciclados, es un material más vulnerable frente al ingreso de agentes externos que pueden producir reacciones deletéreas y afectar su durabilidad.
- El uso de los aditivos propuestos en esta tesis, es una alternativa para mejorar la estructura de poros del mortero, pero las características durables del hormigón reciclado resultante, mantienen una diferencia apreciable frente a los hormigones elaborados en forma convencional.

- Los hormigones elaborados, con reemplazo del 50 % del agregado grueso natural por agregado reciclado de hormigón, al cual se le aplicaron los tratamientos previos, tanto simultáneos como no simultáneos al mezclado de materiales, mostraron una modificación de su estructura de poros, en mayor o menor medida, respecto al hormigón reciclado sin tratamiento previo, presentando un comportamiento mecánico, de absorción capilar y resistividad similares al que posee el hormigón patrón, realizado sin la utilización de agregado reciclado.
- De todas las variantes desarrolladas en esta tesis, para la materialización de los tratamientos previos no simultáneos al mezclado, se pueden resaltar las siguientes observaciones:
 1. Los tratamientos previos de lechada de cemento (L) y de producto A, resultaron ser los que brindaron los mejores resultados y fueron más efectivos que el tratamiento realizado con el producto B.
 2. La implementación de tratamientos previos de lechada de cemento, variando la relación agua/cemento de la lechada (TP1, TP2 y TP3) y los días de secado del agregado luego del tratamiento (1 a 28 días), resultaron tener buena efectividad, pero no se observaron variaciones apreciables para los diferentes casos, esto permite afirmar que para el rango de relaciones agua/cemento utilizado en este estudio, la alternativa más conveniente desde el punto de vista económico sería el uso de la mayor de ellas (agua/cemento = 1). Además, estos resultados muestran la versatilidad de realización del tratamiento previo, pues no requiere de tanta precisión.
 3. La variación de los días de secado del agregado, luego del tratamiento de lechada de cemento (1 a 28 días), mostró, para todas las relaciones a / c utilizadas en las lechadas, que el tiempo de secado de la misma, previa a la utilización del agregado tratado, no tuvo una influencia determinante en las propiedades del hormigón resultante, mostrando un buen desempeño en todos los casos.
 4. Los tratamientos sobre el agregado reciclado, simultáneos al mezclado de materiales, mostraron una eficiencia similar a todos los casos anteriores, por lo tanto, se puede afirmar que brinda una aplicación mucho más simple y directa en la industria de la construcción.

- Desde el punto de vista económico, la aplicación de los tratamientos simultáneos al mezclado son las opciones de mayor viabilidad, pues no generan costos adicionales en su aplicación y mantiene los beneficios económicos y sociales que implica la utilización del agregado reciclado. En cambio, la aplicación de los tratamientos no simultáneos al mezclado implica un aumento en los costos de producción de hormigón, que varía según el material con el cual se hace el tratamiento, siendo el cemento el producto que brinda mayores beneficios a menores costos.
- La elevada absorción capilar del hormigón reciclado sin tratamiento previo, hace que el mismo presente una estructura de poros más abierta que un hormigón tradicional, aun siendo elaborado con la misma relación agua / cemento. Esto fue corroborado con la menor fisuración que se registra en las vigas realizadas con hormigón reciclado, por tener los óxidos mucho mayor espacio dentro de una estructura de poros más abierta, habiendo estado expuestas estas vigas a un proceso de corrosión acelerada.
- La efectividad de los tratamientos previos en la reducción de la absorción capilar y el aumento de la resistividad de los hormigones resultantes, también se vio reflejada en el comportamiento de vigas sometidos a la corrosión de sus armaduras, elaboradas con los hormigones en los que se implementaron estos tratamientos. Se pudo observar que:
 1. El comportamiento frente al proceso de corrosión de las armaduras que presentaron las vigas, en cuyos agregados reciclados se implementó el tratamiento previo del agregado reciclado con Lechada de Cemento y Solución con Aditivo A, fue muy similar al que se desarrolló en la viga elaborada con hormigón convencional; mostrando una activación más lenta de sus armaduras, y un mayor ancho máximo de fisuras y área de fisuración que las vigas elaboradas con hormigones reciclados sin tratamientos previos y con el tratamiento previo de Solución con Aditivo B, los cuales presentaban una estructura de poros más abierta.
 2. En el caso de la implementación de tratamientos previos simultáneos al mezclado de materiales, con diferentes porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado se observó que, las Áreas de Fisuración Totales, los Anchos Máximos de Fisura y su velocidad de crecimiento, resultaron superiores en la viga patrón, reduciéndose estos valores a medida que el porcentaje de reemplazo de agregado

natural por agregado reciclado aumentaba. Sin embargo, aún para elevados porcentajes de reemplazo, mostraron un mejor comportamiento que aquellas vigas elaboradas con hormigón elaborado con un 50 % de reemplazo de su agregado grueso natural por agregado reciclado sin tratamiento previo.

8.3 PROPUESTAS PARA FUTUROS TRABAJOS

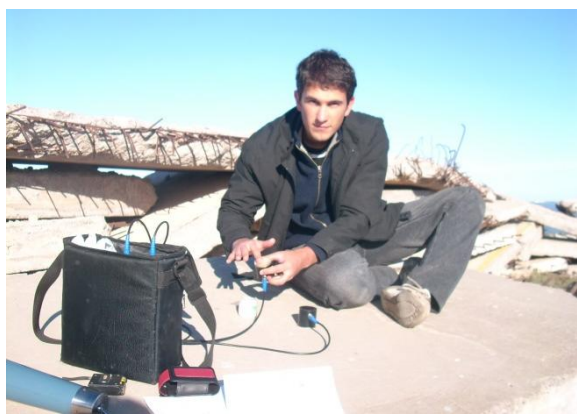
Esta Tesis, por tratarse de un trabajo desarrollado desde el punto de vista de la innovación para la implementación de tratamiento sobre agregados reciclados y diferentes variantes en la elaboración del hormigón, cuenta con innumerables variables para desarrollar en futuras investigaciones. Algunas de ellas, que se podrían mencionar, son:

- Realizar los tratamientos previos sobre el agregado reciclado (simultáneos o no al mezclado de materiales) con otros materiales de desecho, o bien combinar en la elaboración del hormigón, los agregados previamente tratados con la reutilización de otros residuos, como por ejemplo, catalizadores de procesos petroquímicos, mejorando aún más la sustentabilidad de este material.
- Realizar los tratamientos con lechada de cemento simultáneo al mezclado de materiales, con relaciones agua / cemento del tratamiento diferentes a los utilizados en esta tesis, para determinar un rango mayor de efectividad del mismo.
- Evaluar la influencia, en la adherencia entre barras de acero y el hormigón, que genera la sustitución de agregados gruesos naturales por agregados gruesos reciclados de hormigón, cuando estos últimos son sometidos a tratamientos previos.
- Analizar el comportamiento mecánico de elementos estructurales elaborados con hormigones en los cuales se aplican algunas variables planteadas en esta Tesis.
- Realizar determinaciones de la vida útil de vigas fabricadas con hormigón elaborado con agregados reciclados con diferentes tratamientos previos.
- Aunque no se han detectado indicios de merma en la adherencia entre los agregados reciclados y de la pasta cementicia, se podrían realizar estudios dinámicos, sometiendo a vigas a flexión a más de 1.000.000 de ciclos.
- En virtud que se ha determinado que existe una menor densidad del hormigón reciclado, respecto del tradicional, se podría determinar el coeficiente de transmitancia térmica.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Lugares de vertido de desechos de construcción y demolición (Capítulo 4)




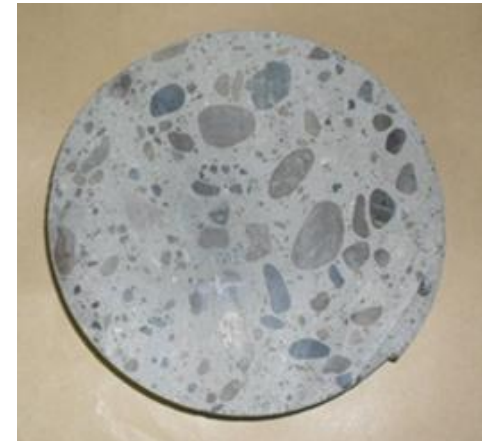


Fotos en diferentes vertederos

APÉNDICE B

Información adicional sobre agregados y materiales obtenidos

(Capítulo 5 a 7)

PATRÓN	HR – 25%
	
HR - 50%	HR - 100%
	

Imágenes obtenidas en cortes transversales de probetas elaboradas con hormigones elaborados con distintos porcentajes de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado

En estas imágenes se observa con claridad el aumento de la presencia de mortero en la masa de hormigón, a medida que el porcentaje de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado es superior.

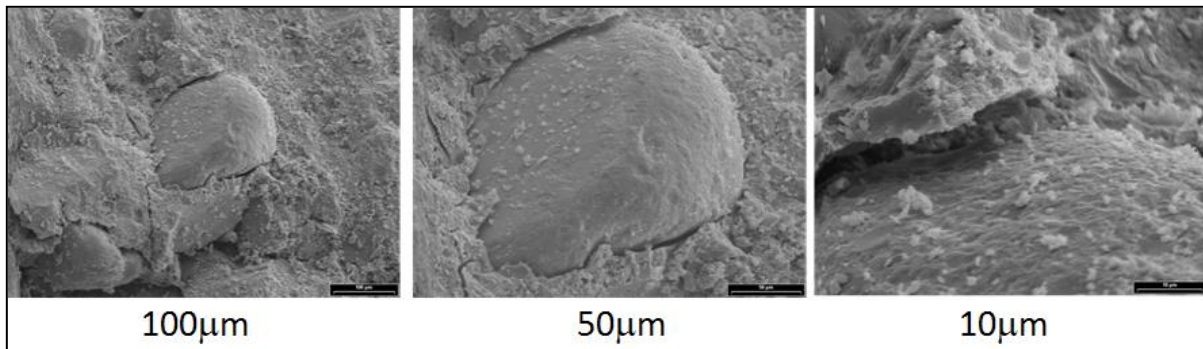
APÉNDICE B

Información adicional sobre agregados y materiales obtenidos

(Capítulo 5 a 7)

Microscopía electrónica de barrido (SEM):

- La muestra analizada fue obtenida de la trituración de hormigón, utilizado en los ensayos realizados en esta tesis.
- Para poder realizar el análisis, se sometió a la muestra a un proceso de metalización, para que sea conductora de calor y electricidad.



Imágenes obtenidas con Microscopía electrónica de barrido (SEM):

Observaciones:

- La imagen muestra con claridad un canto rodado rodeado por mortero
- Se observan micro-fisuras y débil interfase agregado-mortero, producto de la atrituración del hormigón.

APÉNDICE C

Elaboración de hormigón reciclado (Capítulo 5 a 7)



Incorporación de materiales en la hormigonera - hormigonado



Encofrados de vigas de ensayo

APÉNDICE C

Elaboración de hormigón reciclado – Capítulo 5 a 7



Llenado de probetas de ensayo



Encofrados de vigas de ensayo en proceso de llenado

APÉNDICE D

1- Fotos vigas fisuradas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)

VIGA 1: $r / \phi = 2,4$

D



T



S



VIGA 2: $r / \phi = 3,6$

D



T



S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE D

1- Fotos vigas fisuradas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)

VIGA 3: $r / \phi = 4,8$

D



T



S



VIGA 4: $r / \phi = 6$

D



T



S

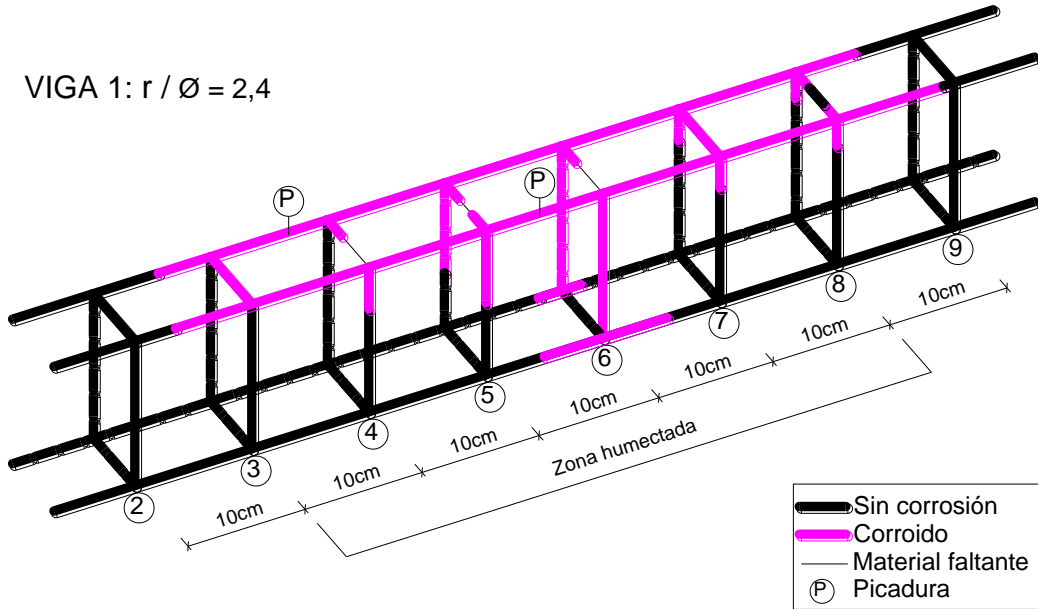


Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

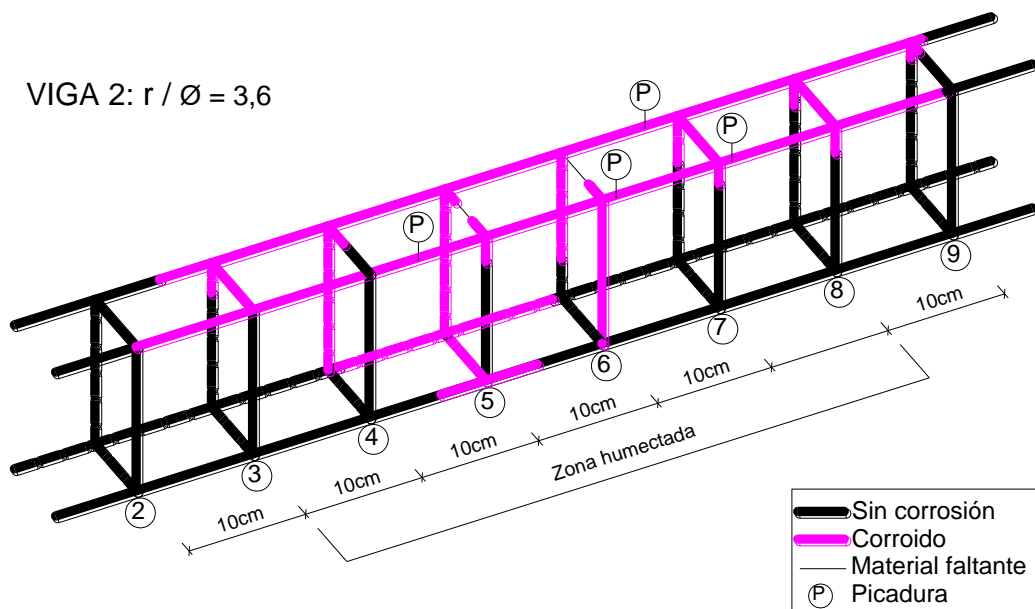
APÉNDICE D

2 -Esquema de ataque corrosivo en vigas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)

VIGA 1: $r / \phi = 2,4$



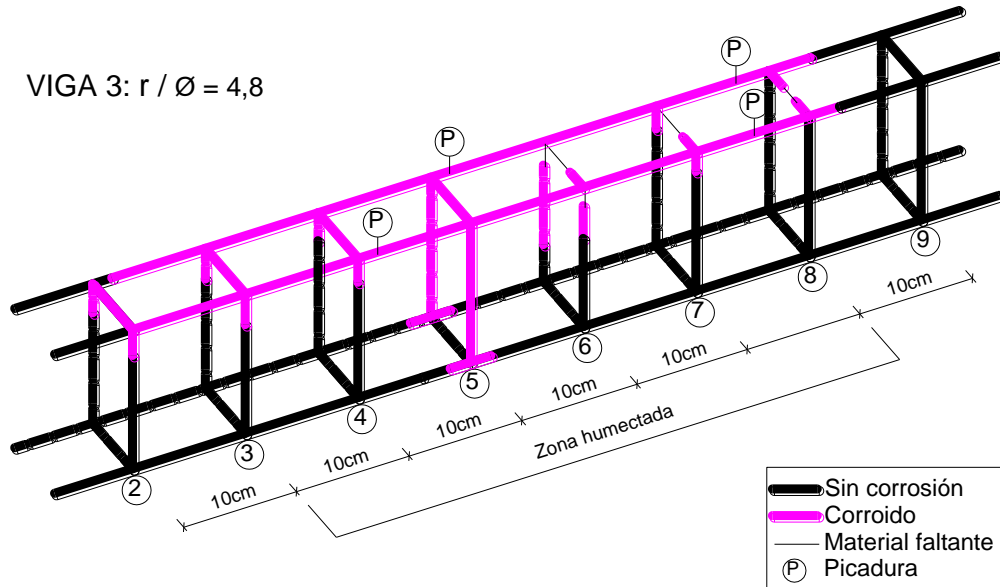
VIGA 2: $r / \phi = 3,6$



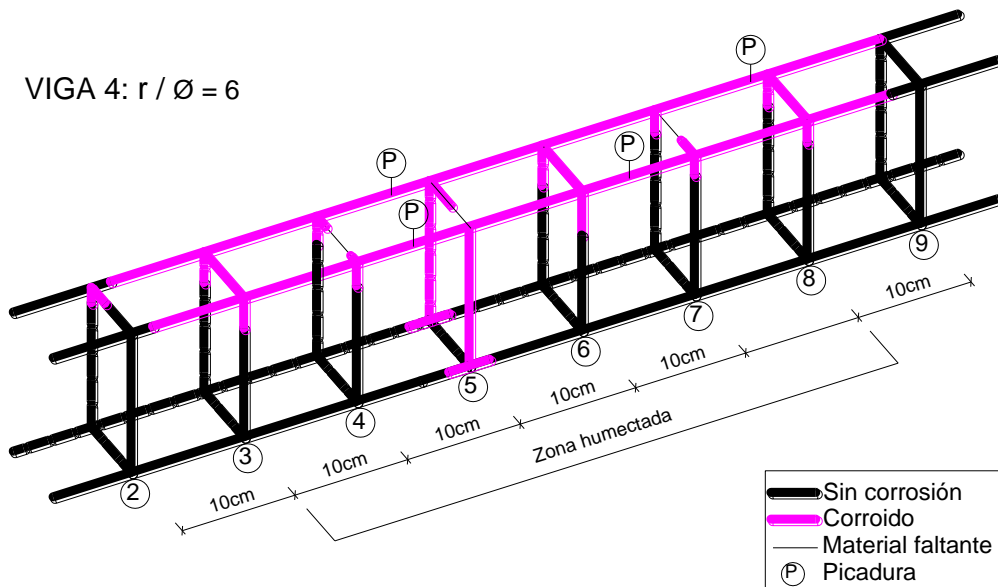
APÉNDICE D

2- Esquema de ataque corrosivo en vigas con diferente r / ϕ (Capítulo 6)

VIGA 3: $r / \phi = 4,8$



VIGA 4: $r / \phi = 6$



APÉNDICE E

1- Fotos vigas fisuradas (diferentes tratamientos previos) (Capítulo 6)

VIGA 1: P

D



T

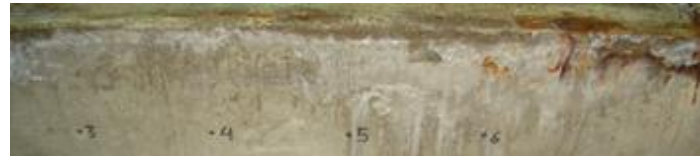


S



VIGA 2: R

D



T



S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE E

1- Fotos vigas fisuradas (diferentes tratamientos previos) (Capítulo 6)

VIGA 3: L

D



T



S



VIGA 4: A

D



T



S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE E

1- Fotos vigas fisuradas (diferentes tratamientos previos) (Capítulo 6)

VIGA 5: B

D



T



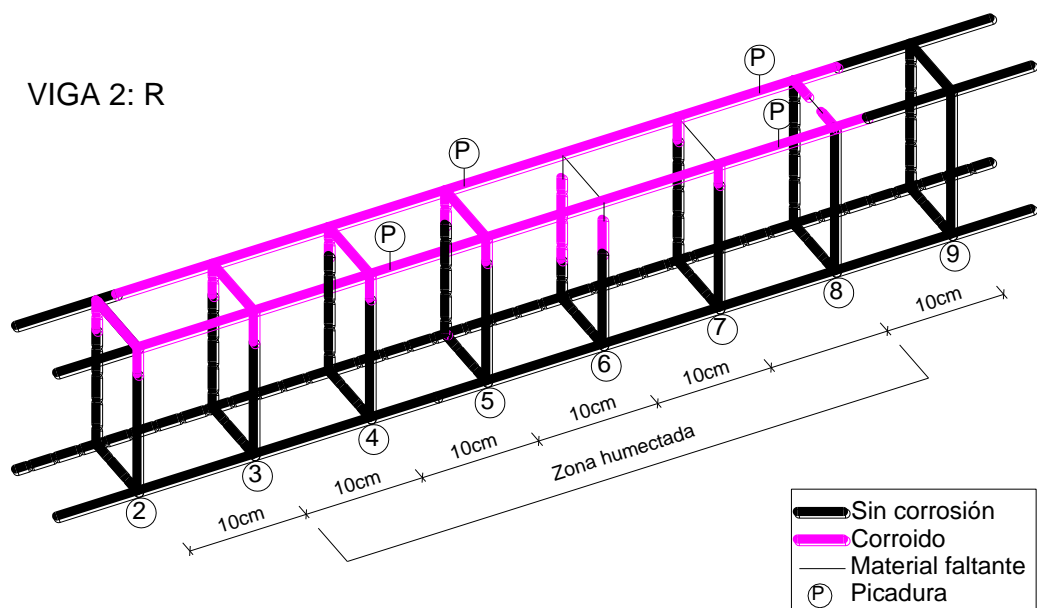
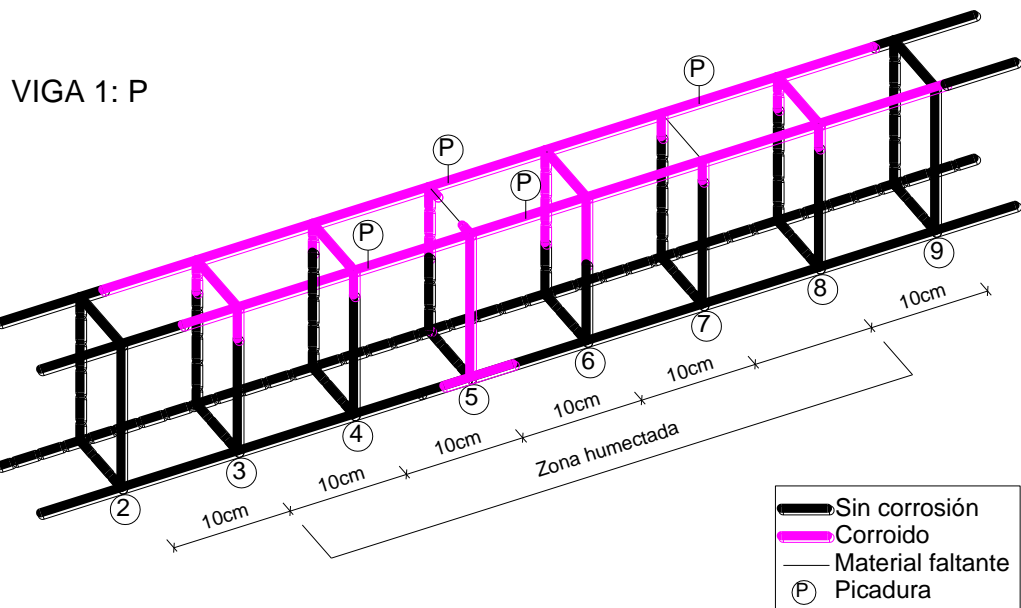
S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

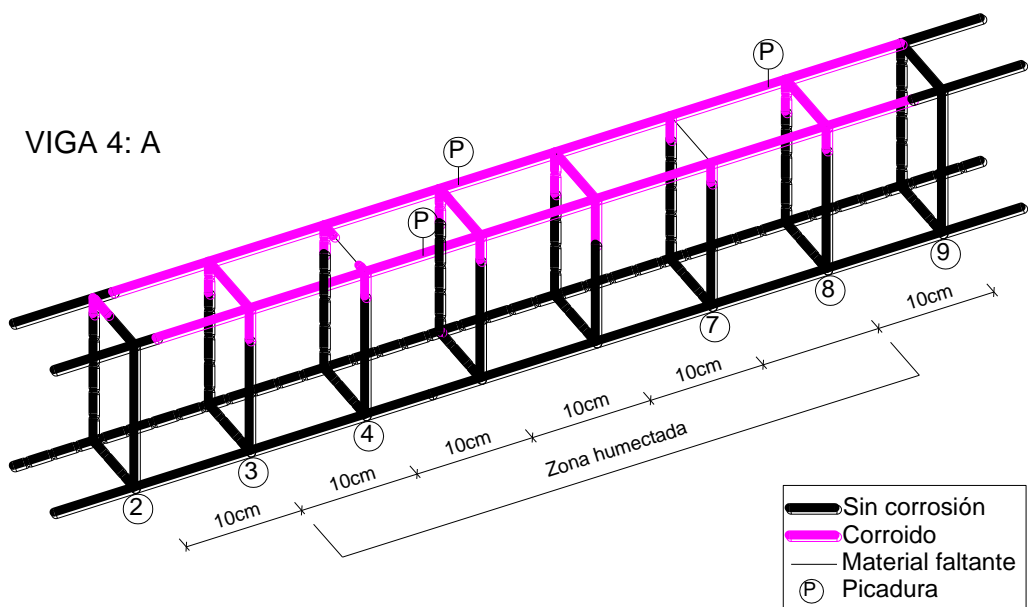
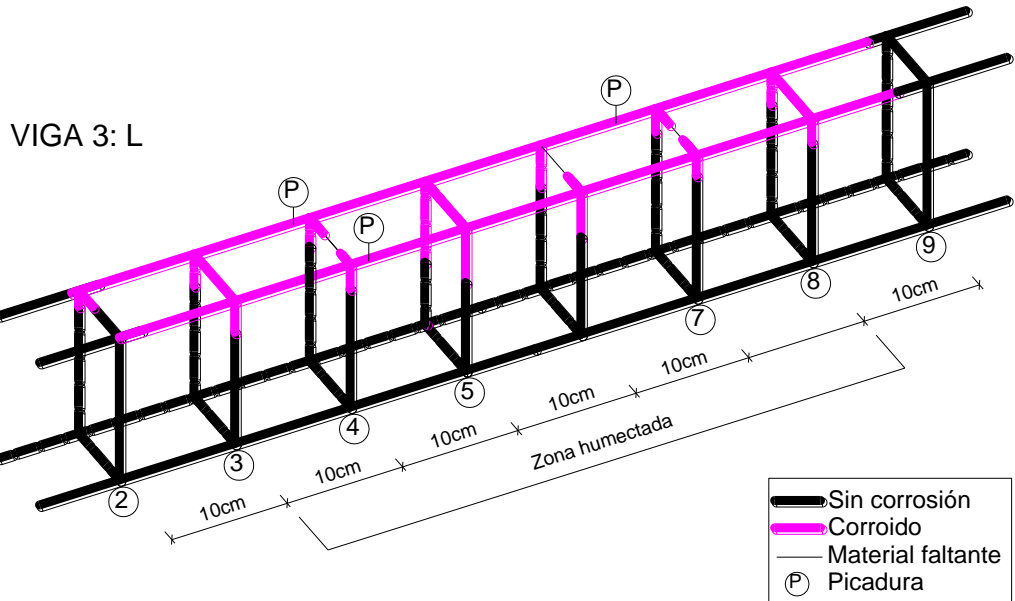
APÉNDICE E

2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 6) (Aplicación de diferentes tratamientos previos)



APÉNDICE E

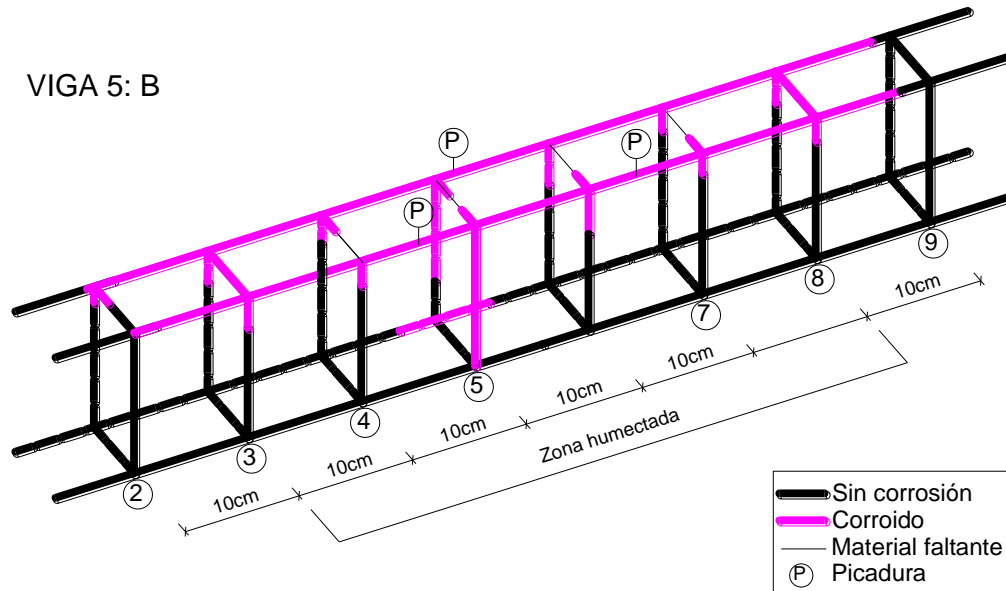
2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 6) (Aplicación de diferentes tratamientos previos)



APÉNDICE E

2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 6) (Aplicación de diferentes tratamientos previos)

VIGA 5: B



APÉNDICE F

1- Fotos vigas fisuradas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

VIGA 1: P

D



T



S



VIGA 2: RT-25

D



T



S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE F

1- Fotos vigas fisuradas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

VIGA 3: RT-50

D



T



S



VIGA 3: RT-75

D



T



S



Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE F

1- Fotos vigas fisuradas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

VIGA 3: RT-100

D



T



S



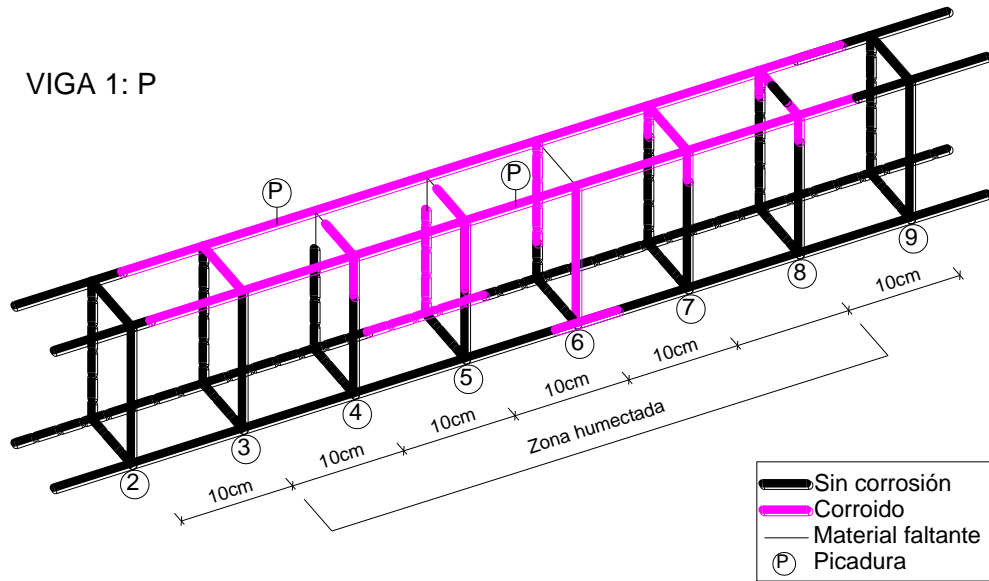
Vista delantera (D)	Vista trasera (T)	Vista superior (S)
---------------------	-------------------	--------------------

APÉNDICE F

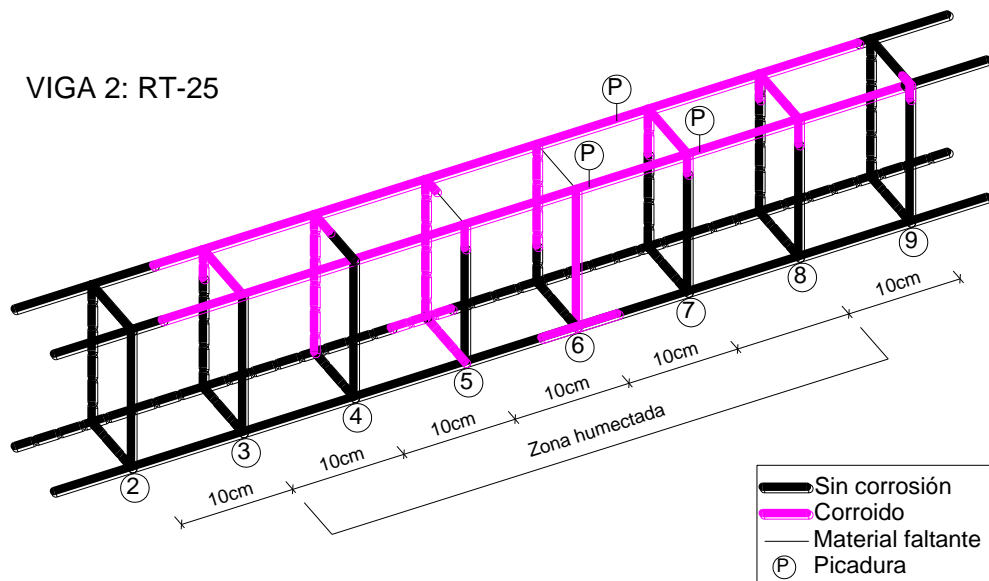
2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

VIGA 1: P



VIGA 2: RT-25

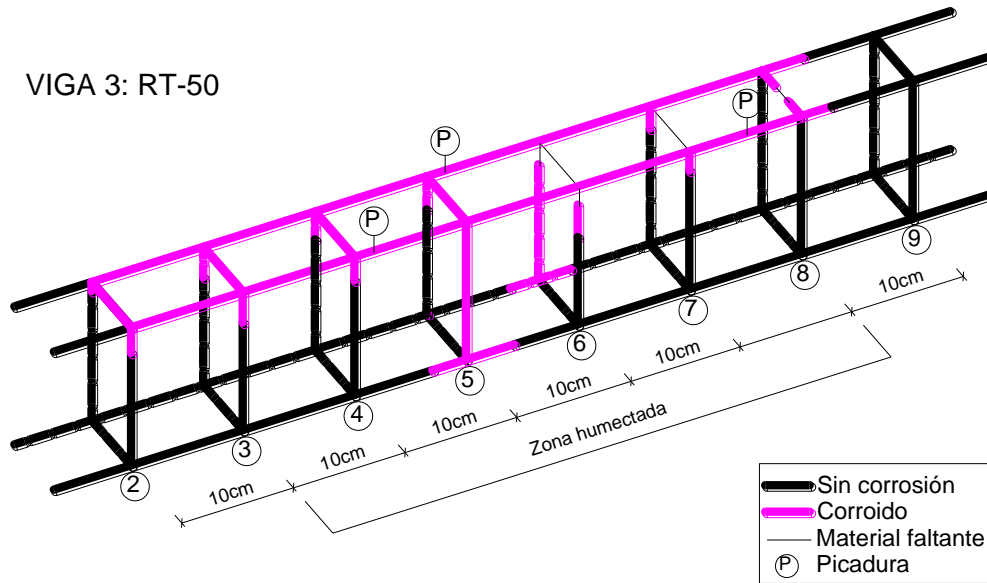


APÉNDICE F

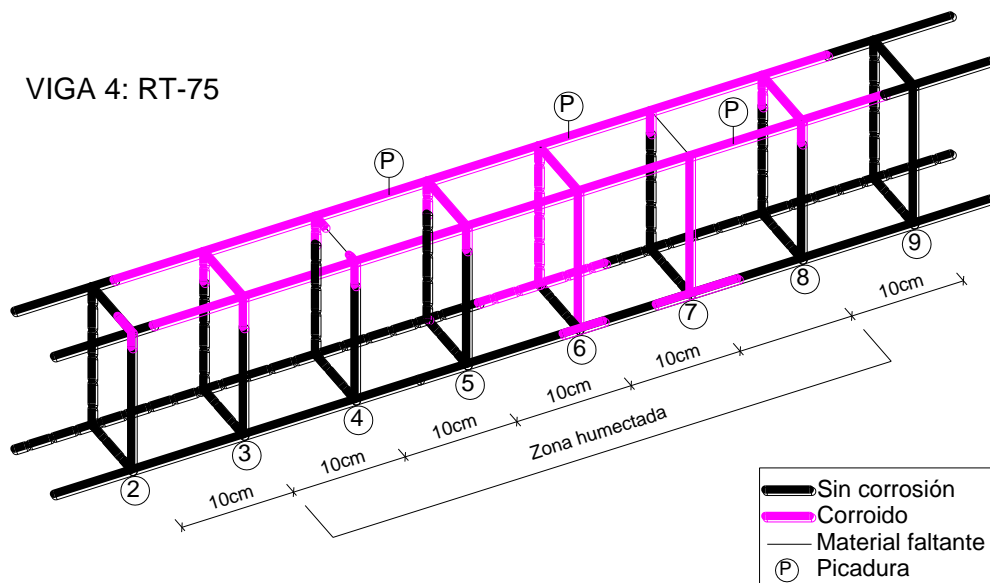
2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

VIGA 3: RT-50



VIGA 4: RT-75



APÉNDICE F

2- Esquema de ataque corrosivo en vigas (Capítulo 7)

(Aplicación de tratamiento previo - diferentes porcentajes de reemplazo)

