

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Tesis Doctoral

# Evaluación de la Sostenibilidad Ambiental de Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición

Elaine Pinto Varela Alberte

Directores:     Enric Vázquez i Ramonich  
                  Marilda Barra Bizinotto

Barcelona, junio de 2012

# CONTENIDO DE LA TESIS

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XIII</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 La Sostenibilidad en la Construcción Civil.....	1
1.1.2 Hormigones como materiales sostenibles.....	6
1.1.3 Hormigones reciclados en España .....	8
1.1.4 Durabilidad y Lixiviación como Parámetros para Medida de la Sostenibilidad de Hormigones Reciclados .....	10
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Estructura de la Tesis.....</b>	<b>13</b>
<b>2 ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS POR DURABILIDAD Y LIXIVIACIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Introducción.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Metodologías para Análisis Ambiental.....	16
2.1.2 Análisis de la Sostenibilidad de Hormigones con Áridos Reciclados.....	19
<b>2.2 La Durabilidad y vida útil como indicadores de la Sostenibilidad de Hormigones .....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Introducción .....	24
2.2.2 Principales aspectos de la durabilidad de hormigones .....	28
2.2.3 Métodos de previsión de la vida útil de hormigones .....	30
2.2.4 Uso de métodos de previsión de la vida útil en el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados .....	35
<b>2.3 La Evaluación del Impacto Ambiental por Lixiviación como Indicador de la Sostenibilidad de Hormigones .....</b>	<b>38</b>
2.3.1 Introducción .....	38
2.3.2 Principales Aspectos de la Evaluación del Impacto Ambiental de Materiales de Construcción por Lixiviación.....	39
2.3.3 Métodos de Análisis de Materiales de Construcción por Lixiviación.....	43
2.3.4 Uso de ensayos de lixiviación en el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados.....	48

<b>2.4</b>	<b>Conclusiones del Capítulo .....</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD PARA USO EN HORMIGONES .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>La Importancia del Uso de Áridos Reciclados en la Sostenibilidad de Hormigones .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2</b>	<b>Legislación y Normativas Vigentes en España.....</b>	<b>59</b>
<b>3.3</b>	<b>Características Generales de los Áridos Reciclados .....</b>	<b>62</b>
3.3.1	Propiedades de los Áridos Reciclados de Hormigón .....	64
3.3.2	Propiedades de los Áridos Reciclados Cerámicos.....	66
<b>3.4</b>	<b>Modo de Producción de Áridos Reciclados en España .....</b>	<b>68</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusiones del Capítulo .....</b>	<b>74</b>
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2</b>	<b>Materiales Utilizados .....</b>	<b>80</b>
4.2.1	Modo de Producción de los Áridos Reciclados.....	80
4.2.1.1	Modo de producción de la Planta de Reciclaje AH .....	81
4.2.1.2	Modo de producción de la Planta de Reciclaje AC.....	82
4.2.2	Caracterización de los Áridos Reciclados .....	83
4.2.2.1	Granulometría.....	84
4.2.2.2	Densidad y Absorción.....	86
4.2.2.3	Composición.....	87
4.2.2.4	Resistencia al desgaste .....	89
4.2.2.5	Análisis Químico – Contenido de cloruros.....	90
4.2.2.6	Análisis Químico – Contenido de sulfatos .....	91
4.2.2.7	Reactividad Álcali-árido.....	92
<b>4.3</b>	<b>Producción de los hormigones reciclados – mezclas y dosificaciones.....</b>	<b>93</b>
<b>4.4</b>	<b>Planteamiento Experimental.....</b>	<b>98</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusiones del Capítulo .....</b>	<b>99</b>
<b>5</b>	<b>ANALISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
<b>5.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>101</b>
<b>5.2</b>	<b>Propiedades Físicas y Mecánicas de los Hormigones Reciclados .....</b>	<b>102</b>
5.2.1	Densidad, Porosidad y Absorción .....	102
5.2.2	Resistencias y Módulo de Elasticidad.....	104
5.2.3	Retracción por Secado.....	106
5.2.3.1	Retracción por secado – Método UNE 83318:1994.....	106
5.2.3.2	Retracción por secado – Método del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción .....	109
5.2.4	Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP).....	111

5.2.5	Discusión de los Resultados.....	118
<b>5.3</b>	<b>Durabilidad de los Hormigones reciclados .....</b>	<b>127</b>
5.3.1	Absorción por capilaridad .....	127
5.3.2	Carbonatación.....	131
5.3.3	Penetración de Cloruros.....	140
5.3.3.1	Penetración de Cloruros – PrUNE 83987:2007 (Método Multiregimen).....	141
5.3.3.2	Penetración de Cloruros – Método AASTHO T259:2002.....	144
5.3.4	Discusión de los Resultados.....	152
<b>5.4</b>	<b>Evaluación del Impacto Ambiental por Lixiviación .....</b>	<b>160</b>
5.4.1	Análisis del Material Granular .....	160
5.4.2	Análisis de los Hormigones con Áridos Reciclados: Ensayo Monolítico.....	164
5.4.3	Discusión de los Resultados.....	171
<b>5.5</b>	<b>Conclusiones del Capítulo.....</b>	<b>174</b>
<b>6</b>	<b>EVALUACIÓN Y MEDIDA DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS</b>	<b>181</b>
<b>6.1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>181</b>
<b>6.2</b>	<b>Definición y Aplicación de los Indicadores y Índice de Durabilidad y Vida Útil .....</b>	<b>183</b>
6.2.1	Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Carbonatación.....	185
6.2.2	Indicador de Durabilidad y Vida Útil por Penetración de Cloruros.....	198
6.2.3	Índice de Vida Útil Total .....	205
<b>6.3</b>	<b>Definición y Aplicación de los Indicadores y Índice de Emisiones de Contaminantes ...</b>	<b>210</b>
<b>6.4</b>	<b>Conclusiones del Capítulo.....</b>	<b>214</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>219</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusiones Finales .....</b>	<b>219</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabajos Futuros .....</b>	<b>226</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>227</b>



# LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. ASPECTOS GENERALES DE LAS PRINCIPALES HERRAMIENTAS DISPONIBLES ACTUALMENTE PARA EL ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL (CARVALHO FILHO, 2001).....	17
TABLA 2.2. EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE ACUERDO CON LA SERIE IRAM-ISO 14000 .....	18
TABLA 2.3. ALGUNAS DEFINICIONES DE DURABILIDAD.....	25
TABLA 2.4. ALGUNAS DEFINICIONES DE VIDA ÚTIL.....	26
TABLA 2.5. ALGUNOS MÉTODOS DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL EXISTENTES EN LA BIBLIOGRAFÍA .....	31/34
TABLA 2.6. EJEMPLOS DE DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS (ANG Y TANG, 1975; ELSAYED, 1996 CITADO POR ANDRADE, 2001).....	37
TABLA 2.7. FACTORES QUÍMICOS, FÍSICOS Y AMBIENTALES QUE AFECTAN LA LIXIVIACIÓN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (VAN DER SLOOT Y DIJKSTRA, 2004) .....	42
FACTORES QUÍMICOS .....	42
TABLA 2.8. ALGUNOS EJEMPLOS DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN A NIVEL EUROPEO .....	47
TABLA 3.1. REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL (EN %) DEL RECICLAJE DE RESIDUOS EN LA PRODUCCIÓN DE ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CIVIL (UDAETA Y KANAYAMA, 1997, CITADO POR JOHN, 2001) .....	58
TABLA 3.2. ÍNDICE DE RENTABILIDAD DE CO <sub>2</sub> .....	58
TABLA 3.3. ALGUNAS PROPUESTAS DE CLASIFICACIONES DE ÁRIDOS RECICLADOS POR COMPOSICIÓN EXISTENTES EN LA BIBLIOGRAFÍA .....	64
TABLA 3.4. ESQUEMA GENERAL DE PROCESOS DE UNA PLANTA DE RECICLAJE TIPO ESPAÑOLA (PROYECTO GEAR, 2010) .....	69
TABLA 3.5. COMPONENTES PREJUDICIALES DEL RCD PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS PARA HORMIGÓN .....	71
TABLA 4.1. GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS GRUESOS .....	84
TABLA 4.2. GRANULOMETRÍA DE LAS MEZCLAS DE ÁRIDOS UTILIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE LOS HORMIGONES.....	85
TABLA 4.3. RESULTADOS DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LOS ÁRIDOS.....	86
TABLA 4.4. CATEGORÍAS DE ÁRIDOS RECICLADOS PROPUESTA POR EL PROYECTO GEAR (2010) .....	89
TABLA 4.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS ÁRIDOS.....	90
TABLA 4.6. TIPOS DE HORMIGONES ESTUDIADOS .....	93
TABLA 4.7. DOSIFICACIONES EMPLEADAS EN LA PRODUCCIÓN DE LOS HORMIGONES.....	94
TABLA 4.8. ESPECIFICACIÓN DE PROBETAS POR ENSAYOS .....	95
TABLA 4.9. CAMPAÑA DE ENSAYOS PROPUESTA .....	98
TABLA 5.1. DOSIFICACIONES DE LOS HORMIGONES OBJETO DEL ESTUDIO .....	101
TABLA 5.2. RESULTADOS DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS .....	102
TABLA 5.3. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN – COMPARACIÓN ENTRE LOS DIVERSOS HORMIGONES PRODUCIDOS.....	105
TABLA 5.4. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS.....	130
TABLA 5.5. MEDIDAS DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN DE LAS PROBETAS ANALIZADAS.....	136
TABLA 5.6. DIFUSIÓN DE CLORUROS DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS .....	143
TABLA 5.7. CONTENIDO DE CLORUROS (% PESO DE HORMIGÓN) OBTENIDO EN TODAS LAS MUESTRAS ENSAYADAS ..	146
TABLA 5.8. PROFUNDIDADES MEDIAS Y MÁXIMAS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS IDENTIFICADAS POR APLICACIÓN DE NITRATO DE PLATA .....	147
TABLA 5.9. VALORES DE Z POR LA APLICACIÓN DE LA FUNCIÓN DEL ERROR DE GAUSS.....	150
TABLA 5.10. VARIABLES ADOPTADAS Y CALCULADAS PARA EL CALCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS SEGÚN LOS RESULTADOS DEL ENSAYO ASTHO T259:2002.....	151
TABLA 5.11. ELEMENTOS LIXIVIADOS EN MG/KG – ENSAYO UNE EN 12457-4:2003 .....	163
TABLA 5.12. VALORES DE EMISIONES ACUMULADAS POR COMPONENTE LIXIVIADO.....	166
TABLA 6.1. VIDA ÚTIL NOMINAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURA (EHE, 2008).....	185

TABLA 6.2. VARIABLES ADOPTADAS POR HORMIGÓN PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL PROPUESTO POR PAPADAKIS Y COL. (1992) .....	188
TABLA 6.3. COEFICIENTES DE AMBIENTE Y AERANTES ( $C_{ENV}$ Y $C_{AIR}$ ) .....	190
TABLA 6.4. COEFICIENTES A Y B .....	190
TABLA 6.5. VARIABLES ADOPTADAS POR HORMIGÓN PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL PROPUESTO POR LA EHE (2008) .....	190
TABLA 6.6. COEFICIENTES DE PROYECTO PARA ESTRUCTURAS SUJETAS A CARBONATACIÓN .....	192
TABLA 6.7. VARIABLES ADOPTADAS Y CALCULADAS POR HORMIGÓN PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL POR CARBONATACIÓN PROPUESTO POR CEB (1997) .....	193
TABLA 6.8. VALORES DE Z POR LA APLICACIÓN DE LA FUNCIÓN DEL ERROR DE GAUSS.....	199
TABLA 6.9. VARIABLES ADOPTADAS POR HORMIGÓN PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL PROPUESTO POR HELENE (1997).....	200
TABLA 6.10. VARIABLES ADOPTADAS POR HORMIGÓN PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PREVISIÓN DE VIDA ÚTIL PROPUESTO POR EHE (2008).....	201
TABLA 6.11. ÍNDICES DE VIDA ÚTIL TOTAL Y CONFIRMACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS HORMIGONES RECICLADOS PRODUCIDOS EN EL TRABAJO .....	207
TABLA 6.12. CATEGORÍAS DE USO EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE VIDA ÚTIL TOTAL .....	208
TABLA 6.13. ÍNDICES DE EMISIONES DE CONTAMINANTES Y CONFIRMACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LOS HORMIGONES RECICLADOS PRODUCIDOS EN EL TRABAJO .....	214

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. CONCEPTO DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....	2
FIGURA 1.2. MODELO DEL “BUILDING CYCLE” (JANSSEN, 2007) .....	4
FIGURA 1.3. CICLO DE VIDA DE LA CONSTRUCCIÓN (AGUADO Y CASANOVA, 1997).....	5
FIGURA 1.4. ACCIONES SOSTENIBLES APLICADAS CICLO DE VIDA DE UNA CONSTRUCCIÓN.....	6
FIGURA 1.5. PORCENTAJE DE PLANTAS DE RECICLAJE ESTUDIADAS POR EL PROYECTO GEAR POR TIPO DE ÁRIDO PRODUCIDO Y COMUNIDAD (PROYECTO GEAR, 2010) .....	10
FIGURA 2.1. ESQUEMA DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (HENDRIKS, 2000).....	18
FIGURA 2.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL BALANCE DE ENTRADAS Y SALIDAS AMBIENTALES DE UN HORMIGÓN CONVENCIONAL Y UN HORMIGÓN CON 20% DE ÁRIDO RECICLADO .....	22
FIGURA 2.3. ESQUEMA DE UNA SITUACIÓN DE TRASFERENCIA DE CONTAMINACIÓN ENTRE FASES DEL CICLO DE VIDA DE UN HORMIGÓN POR CAMBIO DE MATERIA PRIMA .....	23
FIGURA 2.4. CONCEPTO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EN FUNCIÓN DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN DE ARMADURA (ADAPTADO DE HELENE, 1997) .....	27
FIGURA 2.5. CUADRO ESQUEMÁTICO DE UNA CONSTRUCCIÓN Y SU INFLUENCIA EN EL MEDIO POR EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN (ADAPTADO DE VAN DER SLOOT Y KOSSON, 2003).....	40
FIGURA 2.6. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES POR LIXIVIACIÓN PREDOMINANTES EN MATERIALES (ADAPTADO DE VAN DER SLOOT Y COL., 1997).....	41
FIGURA 2.7. COMPORTAMIENTO DE LA LIXIVIACIÓN POR CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES (ADAPTADO DE VAN DER SLOOT Y DIJKSTRA, 2004). .....	43
FIGURA 2.8. FACTORES QUE MODIFICAN EL MEDIO LIXIVIANTE AL PASAR LOS RESULTADOS DE LABORATORIO A LAS CONDICIONES PRÁCTICAS (ADAPTADO DE HENDRIKS, 2000) .....	44
FIGURA 2.9. MARCO ALTERNATIVO DE TRABAJO PARA LA EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS Y MATERIALES SECUNDARIOS (ADAPTADO DE KOSSON Y COL., 2002).....	48
FIGURA 2.10. CICLO DE VIDA DE UN HORMIGÓN RECICLADO CON LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ALOCADAS (ADAPTADO DE VAN DER SLOOT Y COL., 2006) .....	52
FIGURA 3.1. CANTIDAD MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA (%) DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN LOS ÁRIDOS RECICLADOS PRODUCIDOS EN ESPAÑA (PROYECTO GEAR, 2010).....	63
FIGURA 3.2. FIGURA ESQUEMÁTICA DEL ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN.....	66
FIGURA 3.3. FIGURA ESQUEMÁTICA DEL ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO .....	67
FIGURA 3.4. MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN, MORTERO Y PÉTREOS DE ELEMENTOS CERÁMICOS.....	73
FIGURA 4.1. ANÁLISIS COMPARATIVO PROPUESTO EN EL TRABAJO.....	77
FIGURA 4.2. PLAN DE TRABAJO REALIZADO .....	78
FIGURA 4.3. METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS PROPUESTA EN EL TRABAJO .....	79
FIGURA 4.4. (A) ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN AH Y (B) ÁRIDO RECICLADO MIXTO AC .....	80
FIGURA 4.5. LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA DE RECICLAJE AH .....	81
FIGURA 4.6. LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA PLANTA DE RECICLAJE AC.....	83
FIGURA 4.7. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.....	84
FIGURA 4.8. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO DE MEZCLADO EN HORMIGONERA EN SECO .....	85
FIGURA 4.9. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DE LA COMPOSICIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS AC Y AH .....	88
FIGURA 4.10. COMPOSICIÓN DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO .....	88
FIGURA 4.11. PROBETAS SOMETIDAS A LA REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO.....	92
FIGURA 4.12. REACTIVIDAD POTENCIAL A LOS ALCALINOS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS AH Y AC .....	92
FIGURA 4.13. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS EN ESTE ESTUDIO .....	96

FIGURA 4.14. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL PROCEDIMIENTO DE LLENADO, COMPACTACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS EN ESTE ESTUDIO .....	97
FIGURA 5.1. VALORES MEDIOS Y RANGO DE DISPERSIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS (KG/M <sup>3</sup> ).....	103
FIGURA 5.2. VALORES MEDIOS Y RANGO DE DISPERSIÓN DE LA ABSORCIÓN Y LA POROSIDAD DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS (%).....	103
FIGURA 5.3. RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS.....	104
FIGURA 5.4. RESULTADOS DE MODULO DE ELASTICIDAD DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS .....	105
FIGURA 5.5. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO – MÉTODO UNE 83318:1994	107
FIGURA 5.6. RETRACCIÓN DURANTE PERIODO DE CURADO POR HORMIGÓN ESTUDIADO – MÉTODO UNE 83318:1994 .....	107
FIGURA 5.7. RETRACCIÓN POR SECADO DE LOS HORMIGONES HO Y HRH (UNE 83318:1994).....	108
FIGURA 5.8. RETRACCIÓN POR SECADO DE LOS HORMIGONES HO Y HRC (UNE 83318:1994) .....	108
FIGURA 5.9. PÉRDIDA DE PESO DE LOS HORMIGONES HO Y HRH (UNE 83318:1994) .....	108
FIGURA 5.10. PÉRDIDA DE PESO DE LOS HORMIGONES HO Y HRC (UNE 83318:1994) .....	108
FIGURA 5.11. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO – MÉTODO INTERNO DEL LABORATORIO .....	110
FIGURA 5.12. RETRACCIÓN POR SECADO DE LOS HORMIGONES HO Y HRH (MÉTODO INTERNO DE LABORATORIO).....	111
FIGURA 5.13. RETRACCIÓN POR SECADO DE LOS HORMIGONES HO Y HRC (MÉTODO INTERNO DE LABORATORIO) .....	111
FIGURA 5.14. TIPOS DE POROS SEGÚN CONEXIÓN (ADAPTADO DE BUIL E OLLIVIER, 1992) .....	112
FIGURA 5.15. POROSIDADES TOTALES POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (ORIGEN: INTROMAC).....	113
FIGURA 5.16. CURVAS DE INTRUSIÓN DE MERCURIO DE HORMIGONES HO Y HRC (ORIGEN: INTROMAC).....	115
FIGURA 5.17. DISTRIBUCIONES DE POROSIDAD DE HORMIGONES HO Y HRC (ORIGEN: INTROMAC) .....	116
FIGURA 5.18. CURVAS DE INTRUSIÓN DE MERCURIO DE HORMIGONES HO Y HRH (ORIGEN: INTROMAC) .....	117
FIGURA 5.19. DISTRIBUCIONES DE POROSIDAD DE HORMIGONES HO Y HRH (ORIGEN: INTROMAC).....	118
FIGURA 5.20. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE LOS HORMIGONES .....	119
FIGURA 5.21. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE POROSIDAD Y ABSORCIÓN DE LOS HORMIGONES .....	119
FIGURA 5.22. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE POROSIDAD Y DENSIDAD DE LOS HORMIGONES .....	119
FIGURA 5.23. COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE POROSIDAD TOTAL DE LOS HORMIGONES OBTENIDOS A PARTIR LOS DOS MÉTODOS REALIZADOS EN EL ESTUDIO.....	120
FIGURA 5.24. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS HORMIGONES HO Y HRH .....	121
FIGURA 5.25. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN Y POROSIDAD DE LOS HORMIGONES HO Y HRC .....	121
FIGURA 5.26. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y LA CANTIDAD DE ÁRIDO RECICLADO DE LOS HORMIGONES.....	124
FIGURA 5.27. CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD Y LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS HORMIGONES.....	124
FIGURA 5.28. CORRELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS DEL 778º DÍA DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO DEL MÉTODO INTERNO DE LABORATORIO Y LOS VALORES DE POROSIDAD POR INTRUSIÓN POR MERCURIO DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.....	125
FIGURA 5.29. CORRELACIÓN ENTRE LA RETRACCIÓN POR SECADO Y LA PÉRDIDA DE PESO DE LOS HORMIGONES HO Y HRH - MÉTODO UNE 83318:1994.....	126
FIGURA 5.30. CORRELACIÓN ENTRE LA RETRACCIÓN POR SECADO Y LA PÉRDIDA DE PESO DE LOS HORMIGONES HO Y HRC - MÉTODO UNE 83318:1994.....	126
FIGURA 5.31. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR .....	128
FIGURA 5.32. ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS - INCREMENTO DE MASA POR MINUTOS.....	129
FIGURA 5.33. ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS - INCREMENTO DE MASA EN FUNCIÓN DE LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO DE LECTURA ( $\sqrt{t}$ ), EN MINUTOS A LA UN MEDIO.....	129
FIGURA 5.34. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES PRODUCIDOS .....	131

FIGURA 5.35. GRADO DE CARBONATACIÓN DE LOS HORMIGONES EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (ADAPTADO DE SANJUAN, 1992).....	132
FIGURA 5.36. ESQUEMA DE LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS UTILIZADAS EN EL ENSAYO DE CARBONATACIÓN ....	133
FIGURA 5.37. VARIACIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA EN EL INTERIOR DE LAS BOLSAS PLÁSTICAS CON GAS CO <sub>2</sub> .....	134
FIGURA 5.38. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LAS BOLSAS PLÁSTICAS CON GAS CO <sub>2</sub> .....	134
FIGURA 5.39. REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL PROCESO DE MEDIDA DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN EN LAS MINI PROBETAS .....	135
FIGURA 5.40. VARIACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES MEDIA Y MÁXIMA DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO (CM/DÍA) DEL HORMIGÓN HO .....	137
FIGURA 5.41. VARIACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES MEDIA Y MÁXIMA DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO (CM/DÍA) DEL HORMIGÓN HRH 20% .....	137
FIGURA 5.42. VARIACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES MEDIA Y MÁXIMA DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO (CM/DÍA) DEL HORMIGÓN HRC 20%.....	137
FIGURA 5.43. PERFIL DE LAS PROBETAS SOMETIDAS A MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN EN LA EDAD DE 360 DÍAS .....	138
FIGURA 5.44. COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN EN LA EDAD DE 360 DÍAS (CM/MIN <sup>0,5</sup> ).....	139
FIGURA 5.45. ESQUEMA DE LA MUESTRA UTILIZADA EN EL ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR .....	141
FIGURA 5.46. INSTALACIÓN DEL ENSAYO: MEDIDA DE LA DIFERENCIA POTENCIAL EFECTIVA .....	142
FIGURA 5.47. CURVAS DE EVOLUCIÓN DE LA DIFUSIÓN DE LOS CLORUROS EN LOS HORMIGONES PRODUCIDOS .....	144
FIGURA 5.48. DIBUJO ESQUEMÁTICO DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS – MÉTODO ASTHO T259:2002 .....	145
FIGURA 5.49. VALORES MEDIOS Y RANGO DE DISPERSIÓN DEL CONTENIDO DE CLORUROS OBTENIDO EN LAS PROFUNDIDADES DE 0-13 Y 13-25 MM EN LAS MUESTRAS SOMETIDAS A LA SOLUCIÓN DE CLORUROS (%) .....	147
FIGURA 5.50. MEDIA Y RANGO DE VARIACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES MEDIAS Y MÁXIMAS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS OBTENIDAS POR TIPO DE HORMIGÓN ANALIZADO (%) .....	148
FIGURA 5.51. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE CLORUROS DE LOS HORMIGONES OBTENIDOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO AASTHO T259:2002 (D <sub>HELENE</sub> Y D <sub>EHE</sub> ) .....	152
FIGURA 5.52. CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN D <sub>HELENE</sub> Y D <sub>EHE</sub> .....	152
FIGURA 5.53. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE ABSORCIÓN CAPILAR Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.....	155
FIGURA 5.54. CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN Y LA POROSIDAD (MIP), RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS .....	156
FIGURA 5.55. CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN Y DE ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.....	157
FIGURA 5.56. CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN Y DE DIFUSIÓN DE CLORUROS (AASTHO T259:2002) DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS .....	157
FIGURA 5.57. CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS (AASTHO T 259 :2002) Y LA POROSIDAD POR INTRUSIÓN POR MERCURIO Y EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR DE LOS HORMIGONES HO Y HRC .....	160
FIGURA 5.58. EQUIPO DE AGITACIÓN UTILIZADO PARA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS SEGÚN UNE EN 12457-4:2003 .....	161
FIGURA 5.59. VALORES DE EMISIONES DE CL <sup>-</sup> Y SO <sup>=4</sup> DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO RECICLADO .....	164
FIGURA 5.60. VALORES DE EMISIONES DE LOS DEMÁS ELEMENTOS ANALIZADOS DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO RECICLADO .....	164
FIGURA 5.61. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL ENSAYO NEN 7345 .....	165
FIGURA 5.62. RESULTADOS DE LIXIVIACIÓN – NEN 7345:1995.....	168/170
FIGURA 5.63. VALORES CALCULADOS DE EMISIONES ACUMULATIVAS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CADA COMPONENTE LIXIVIADO EN LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.....	173
FIGURA 6.1. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN OBTENIDO POR MEDIO EXPERIMENTAL .....	186

FIGURA 6.2. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS DE ACUERDO CON EL MÉTODO PAPADAKIS Y COL. (1992) .....	188
FIGURA 6.3. CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE DENSIDAD Y CARBONATACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS .....	189
FIGURA 6.4. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS DE ACUERDO CON EL MÉTODO EHE (2008).....	191
FIGURA 6.5. CORRELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN OBTENIDOS A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DIRECTA DE LA LEY DE FICK Y DEL MÉTODO PROPUESTO POR LA EHE (2008) .....	191
FIGURA 6.6. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS DE ACUERDO CON EL MÉTODO CEB (1997) .....	193
FIGURA 6.7. CORRELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN OBTENIDOS A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DIRECTA DE LA LEY DE FICK Y DEL MÉTODO PROPUESTO POR CEB (1997) .....	194
FIGURA 6.8. CORRELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN Y POROSIDAD POR INTRUSIÓN DE MERCURIO OBTENIDOS DURANTE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....	195
FIGURA 6.9. CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE POROSIDAD POR INTRUSIÓN DE MERCURIO DE LOS HORMIGONES Y SU CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO AH Y AC .....	195
FIGURA 6.10. CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE POROSIDAD POR INTRUSIÓN DE MERCURIO DE LOS HORMIGONES OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE Y A TRAVÉS DEL USO DE LAS FORMULAS 6.12 Y 6.13 .....	197
FIGURA 6.11. VIDA ÚTIL (EN AÑOS) DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS DE ACUERDO CON EL INDICADOR DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL POR CARBONATACIÓN ( $VU_c$ ) .....	197
FIGURA 6.12. CORRELACIÓN DE LOS VALORES DE VIDA ÚTIL (EN AÑOS) POR CARBONATACIÓN OBTENIDOS APLICÁNDOSE DIRECTAMENTE LOS MÉTODOS DE LA LEY DE FICK Y DEL CEB (1997) Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS APLICÁNDOSE EL INDICADOR $VU_c$ .....	198
FIGURA 6.13. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR PENETRACIÓN DE CLORUROS CALCULADO DE ACUERDO CON EL MÉTODO DE HELENE (1997) Y A PARTIR DE LOS VALORES DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN $D_{HELENE}$ Y $D_{EHE}$ .....	201
FIGURA 6.14. TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR PENETRACIÓN DE CLORUROS CALCULADO DE ACUERDO CON EL MÉTODO DE EHE (2008) Y A PARTIR DE LOS VALORES DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN $D_{HELENE}$ Y $D_{EHE}$ .....	202
FIGURA 6.15. CORRELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE INICIACIÓN (EN AÑOS) POR PENETRACIÓN DE CLORUROS OBTENIDO A TRAVÉS DE LOS MÉTODOS PROPUESTOS POR HELENE (1997) Y POR LA EHE (2008) .....	202
FIGURA 6.16. CORRELACIÓN ENTRE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN $D_{HELENE}$ DE LOS HORMIGONES Y SU CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO .....	203
FIGURA 6.17. CORRELACIÓN ENTRE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN $D_{EHE}$ DE LOS HORMIGONES Y SU CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO.....	203
FIGURA 6.18. VIDA ÚTIL (EN AÑOS) DE LOS HORMIGONES ANALIZADOS DE ACUERDO CON EL INDICADOR DE DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL POR PENETRACIÓN DE CLORUROS ( $VU_{PC}$ ) .....	205
FIGURA 6.19. CORRELACIÓN ENTRE LAS VIDAS ÚTILES (EN AÑOS) POR PENETRACIÓN DE CLORUROS OBTENIDAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LA EHE (2008) Y DEL INDICADOR $VU_{PC}$ .....	205
FIGURA 6.20. $VU_c$ DE LOS HORMIGONES EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO .....	209
FIGURA 6.21. $VU_{PC}$ DE LOS HORMIGONES EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO .....	209
FIGURA 6.22. $VU_c$ DE LOS HORMIGONES EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO .....	210
FIGURA 6.23. $VU_{PC}$ DE LOS HORMIGONES EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO .....	210
FIGURA 6.24. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD POR IMPACTO AMBIENTAL POR LIXIVIACIÓN – USO DE INDICADORES Y ÍNDICES DE EMISIONES DE CONTAMINANTES .....	213

# RESUMEN

El hormigón es considerado uno de los materiales más importantes de la construcción civil. Su valor como material sostenible se determina por su durabilidad, necesidad de poco mantenimiento y capacidad de reutilizarse, reciclarse o recuperarse. En este sentido, el uso de árido reciclados provenientes de RCD puede contribuir aún más para la sostenibilidad de un hormigón, pues produce diversos beneficios ambientales y permite el cierre ideal de su ciclo productivo.

La sostenibilidad de uso de áridos reciclados en la producción de hormigones, sin embargo, se establece por los siguientes aspectos: el árido reciclado debe estar disponible a cortas distancias, y el hormigón reciclado producido no puede generar impacto al medio y debe ser tan durable como su opción convencional equivalente.

En España, la disponibilidad de productores de árido reciclado es lo suficientemente alta para viabilizar el uso de este material. En cambio, la oferta de áridos reciclados que se adecuen a las condiciones impuestas por la normativa española actual para la producción de hormigones es bastante reducida. El uso de áridos reciclados mixtos en la producción de hormigones debe ser valorado pues es un paso muy importante para consolidar este tipo de reciclaje en el país.

A tal efecto, este estudio propone el análisis de la sostenibilidad de hormigones producidos con áridos reciclados españoles que no cumplen los requisitos impuestos por la normativa española actual para la producción de hormigones, a partir del análisis de su durabilidad e impacto ambiental.

Se ha realizado una amplia campaña experimental donde se ha evaluado la durabilidad y el impacto ambiental por lixiviación de hormigones producidos con distintas proporciones de áridos reciclados gruesos (20%, 50% y 100%). Dos tipos de áridos reciclados han sido escogidos: uno compuesto mayoritariamente por elementos de mortero, hormigón y áridos no ligados, pero con una cantidad importante de elementos asfálticos (árido AH), y uno compuesto con una importante cantidad de elementos cerámicos (árido AC). Como referencia, se ha producido un hormigón hecho con 100% de árido convencional.

Las propiedades analizadas han sido: porosidad, absorción, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, retracción por secado, porosimetría de intrusión de mercurio, absorción capilar, carbonatación, penetración de cloruros, y lixiviación del material granular y del material monolítico.

La evaluación y medida de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en este trabajo se ha realizado a través de índices y indicadores de previsión de vida útil y de impacto ambiental por lixiviación creados a partir de modelos matemáticos disponibles en la bibliografía y/o resultados obtenidos en la etapa experimental.

Finalmente, se defiende un nuevo enfoque para el uso sostenible de hormigones reciclados. Se ha realizado el análisis y la comparación de los resultados obtenidos entre sí, con el objetivo de validar el método desarrollado y de definir niveles de calidad técnicos y ambientales de uso de áridos reciclados en hormigón de acuerdo con las necesidades, deficiencias y calidades de cada situación.



# ABSTRACT

The concrete is one of the most important construction materials. Its sustainability is determined by its durability, its low maintenance and its ability to be reused, recycled or recovered. Hence, the use of recycled aggregates produced from CDW (Construction and Demolition Wastes) can further contribute to the sustainability of the concretes, generating many environmental benefits and allowing the ideal closure of the life cycle of this material.

However, the following aspects govern the sustainability of recycled aggregates used in concrete production: the recycled aggregate should be available at short distances, and the recycled concrete produced should not impact the environment and must be as durable as its equivalent conventional option.

In Spain, the number of producers of recycled aggregate is high enough to make viable the use of this material. However, the supply of recycled aggregates suitable, according to national legislation, for production of concretes is quite low. The use of mixed recycled aggregates for production of concrete should be better valued since it is a very important step into the consolidations of this recycling sector in the country.

Therefore, this study aims to analyze the sustainability of concretes made with recycled aggregates produced in Spain that do not meet the requirements of the current national legislation for concrete production. These investigations were conducted through the evaluation of the durability and the environmental impact, done by the leaching analysis.

The evaluation of durability and environmental impact were done by an extensive experimental campaign with concretes produced using different proportions of coarse recycled aggregates (20%, 50% and 100%). Two types of recycled aggregates have been chosen: one mainly comprised of mortar, concrete and unbound aggregates elements, but with a significant amount of asphalt elements (aggregate AH), and another comprised of a large amount of ceramic elements (aggregate AC). Also, concretes made with 100% of conventional aggregate were produced as reference.

The properties examined were: porosity, absorption, compressive strength, elastic modulus, drying shrinkage, mercury intrusion porosimetry, capillary absorption, carbonation, chloride penetration, and leaching of both the granular and the monolithic materials.

The estimation and evaluation of the sustainability of the recycled concretes produced in this work has been done through indexes and indicators of the forecast lifespan and of the environmental impact created from mathematical models available in the literature and/or experimental results from this study.

Finally, a new approach to the sustainable use of recycled concretes is advocated. The results obtained have been analyzed and compared, in order to validate the method developed and to define technical and environmental quality levels for recycled aggregates used in concretes in accordance with the needs, limitations and strengths of each situation.



# AGRADECIMIENTOS

Durante el periodo que he desarrollado mi tesis doctoral, diversas instituciones y personas han contribuido de modo significativo y valioso para que mi trabajo resultara en este documento. A todas ellas quisiera expresar mi profunda gratitud y resaltar que, sin su ayuda y apoyo, este trabajo no sería posible:

A mis directores de tesis al Profesor Dr. Enric Vazquez y a la Profesora Dra. Marilda Barra por su orientación y su continuo e incondicional apoyo a mi trabajo, y sobre todo gracias por incentivar me a buscar siempre lo mejor y máximo de mi capacidad.

A mi familia, por compartir y perseguir junto a mí mis sueños personales y profesionales. Sobre todo a Alex, cuyo apoyo y animo fueron fundamentales para la conclusión de este trabajo.

Al Programa Alban, por el apoyo económico otorgado y que ha sido esencial para el buen desarrollo de mis estudios.

Al Programa de Doctorado en Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña, en especial a sus coordinadores al Profesor Dr. José Maria Baldasano y al Profesor Dr. Santiago Gassó, por mi aceptación en este prestigioso programa de estudios.

A todos los participantes del Proyecto GEAR, en especial a los coordinadores y a todo el equipo investigador, por la confianza en mi trabajo y por las valiosas enseñanzas. Agradezco especialmente al Coordinador General Alfons Güell y al Secretario Emili Roig, por el apoyo, la confianza, los enseñamientos y la amistad.

A todos los socios del GERD - Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrivos, por la confianza en mi trabajo y por los provechosos conocimientos dados a mí respecto a la industria del reciclaje en España. En especial, a las empresas Germans Cañet Xirgu S.L. y TEC REC S.L., por su apreciable aportación en material.

Al Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción, por el importante apoyo en la realización de los ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio.

Al Profesor Dr. Antonio Figueredo y al Profesor Dr. Paulo Helene, de la Universidade de São Paulo, por su inestimable orientación en una etapa decisiva del desarrollo de este trabajo, y a la Profesora Dra. Susana Valls, de la Universidad Politécnica de Cataluña, por todo soporte y respaldo.

Al Investigador Dr. Diego Fernando Aponte y al Profesor Dr. Sergio Herinque Piarissi, ambos de la Universidad Politécnica de Cataluña, por toda la ayuda, colaboración, apoyo, animo y amistad incondicionales sin los cuales no alcanzaría concluir este trabajo.

A todas las personas del departamento de Ingeniería de la Construcción y del departamento de Estructuras que me han apoyado durante toda mi campaña experimental. Agradezco en especial a Eufronio, Mati, Sergi, Patricia, Francesc, Tomás, Camilo y Albert.

A Yuji y Mashajiro, estudiantes de pasantía de Nagaoka University of Technology, por su preciosa ayuda en las actividades de laboratorio y por su amistad. どうもありがとうございます.

A todos mis compañeros de doctorado por su apoyo y amistad durante todos estos años. Muchas gracias por haberme enseñado, compartido, apoyado o simplemente por haber estado a mi lado. Quiero recordar especialmente con todo el cariño a Mauro, Desilvia, Vanessa y Juliana.

A todos los funcionarios de la Universidad Politécnica de Cataluña, desde los equipos de secretariado a los equipos de seguridad y limpieza, que me han brindado su simpatía y auxilio en los momentos que he solicitado.

A todos mis amigos y parientes en Brasil, España y Panamá, por su apoyo y cariño y sus constantes votos de éxito personal y profesional. En especial, quiero recordar a Telma, Vó Dalva, Tía Filomena, Tía Lola, Doña Amalia, Don Lorenzo, Ananda, Karen, Rodrigo, Camila, Alexandre Brum, Jordi, Montse, Anna, Alexandre Oliveira, Elisabeth, Gabriela, Gerardo, Edith y Isabel.

Finalmente, quisiera agradecer a todos aquellos no han sido citados, pero que han contribuido de alguna manera para el éxito de este trabajo.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 JUSTIFICATIVA

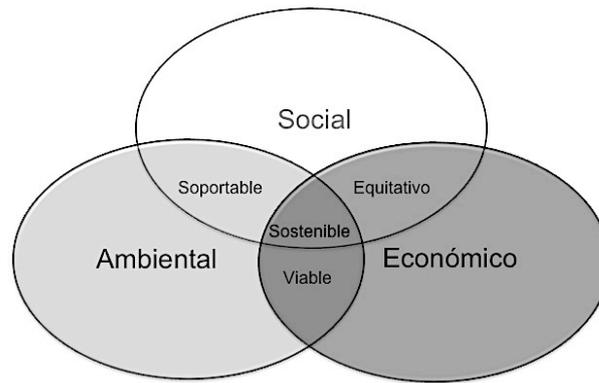
#### 1.1.1 LA SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN CIVIL

La palabra sostenible viene de la expresión en Latín *sustinere* (*tenere*, sostener; *sus*, arriba de). Ha sido utilizada, a partir de la década de 80, en el sentido de expresar la sostenibilidad de las actividades humanas sobre el planeta. De este concepto, se ha generado la definición más comúnmente adoptada para esta expresión, divulgada por la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, en el Informe Brundtland, publicado en 1987. De acuerdo con el referido documento, se considera sostenible el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras (Bruntland, 1987).

Inicialmente relacionado exclusivamente a las necesidades ambientales, el concepto de sostenibilidad pasa a ser vinculado, durante la Cumbre Rio 92, al vector social, que implica en una distribución más equitativa del desarrollo, y al vector económico, que garantiza que las acciones deben ser viables económicamente.

En la Cumbre Mundial 2005 (The 2005 World Summit), realizada en septiembre de 2005 en la Oficina las Naciones Unidas de Nueva York, el concepto de sostenibilidad se presenta relacionado al equilibrio de las demandas ambientales, sociales y económicas (United Nations General Assembly, 2005). Para que una acción humana sea sostenible, ella debe ser ecológicamente correcta, económicamente viable y socialmente y culturalmente justa. Todas las demandas son igualmente importantes para el alcance de la sostenibilidad. La visión de estos tres vectores, como los pilares de la sostenibilidad es claramente representado en la figura 1.1.

En general, las definiciones actuales sobre “sostenibilidad” o “desarrollo sostenible” son evasivas y permiten muchas interpretaciones (Kates, y col., 2005; EurActiv.com, 2006; International Institute for Sustainable Development, 2009). Definir objetivos claros para el alcance de la sostenibilidad global es, por lo tanto, una tarea muy difícil.



**Figura 1.1. Concepto de Desarrollo Sostenible**

El concepto de sostenibilidad también es empleado en escala reducida, por área de actuación humana, con el objetivo de definir metas específicas y límites cuantificables. Se entiende que los retos deben ser específicos a cada sector económico.

Según el EconomyWacht (2009), la construcción civil es uno de los sectores económicos más importantes y influyentes en la economía mundial. La contribución de esta industria hacia el PIB global gira alrededor de un décimo del total. Esta industria también es un gran generador de empleo, proporcionando trabajo a casi el 7% del total de la población mundial.

En contrapartida, es el sector industrial que más consume material en todas las partes del mundo. En Japón, cerca de 50% de los recursos naturales se destinan a la construcción civil (Kassai, 1998), mientras que en EUA, se estima un consumo de 75% (Matos y Wagner, 1999).

También es importante considerar la energía utilizada en la transformación de las materias primas en productos, en su transporte, además de los recursos adicionales necesarios con mantenimiento, desmovilización y demolición. En ese contexto, el sector también es el responsable por gran parte del consumo de energía y agua y por significativa generación de residuos (Plessis, 2002).

Según el EconomyWacht (2009), la energía consumida por la industria de la construcción civil, en forma de electricidad o combustible, gira alrededor de 2/5 de la energía total consumida en todo el mundo.

Respecto a la generación de residuos, de acuerdo con John (2001), se estima que la producción mundial de residuos de construcción y demolición (RCD) se encuentra entre valores de 163 a más de 3000 kg por cápita, con valores típicos entre 400 y 500 kg por cápita.

En Europa, de acuerdo con el Informe Visión 2030 del PTEC- Plataforma Tecnológica Española de la Construcción (PTEC, 2005), el sector de la construcción civil consume alrededor de 40% de los recursos naturales, genera cerca del 40% de los residuos y produce cerca de 35% de los gases de efecto invernadero en el país. Otros datos generales indican que la industria de la construcción civil es la responsable por el consumo de 50% de los recursos naturales, de 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50% del total de los residuos generados en el mundo (Anink y col., 1996).

Con el foco en el sector de la industria de la construcción civil, la sostenibilidad puede ser interpretada como el modo de proyectar y construir en armonía con el medio ambiente, preservando la salud física y los aspectos sociales de la humanidad, de forma económicamente viable.

Una importante acción sostenible es maximizar el uso de energía e material renovable. Como ejemplo, se puede citar la sustitución de la fuente de energía del carbón por una fuente de energía vegetal, renovable y limpia (madera, fibras, y otros). Acciones en este sentido contribuyen para minimizar problemas de calentamiento global y lluvias ácidas (John y col., 2009).

Por otro lado, el aumento del uso de materiales vegetales en la construcción es limitado. No es posible sustituir todos los materiales utilizados en la construcción civil por recursos vegetales sin realizar grandes procesos industriales y/o sin comprometer otras fuentes de recurso. Sería necesario toda área cultivable del planeta para producir madera en cantidad suficiente para atender la demanda actual de la industria de la construcción civil (Curwell y Cooper, 1998).

La desmaterialización es considerada una herramienta adecuada para alcanzar la sostenibilidad en una construcción. Este proceso consiste en obtener el mismo desempeño con menores cantidades de materiales, representando la reducción de contaminación, incluyendo la lluvia ácida y los gases de efecto invernadero (John y col., 2009).

El concepto de desmaterialización también está vinculado a la sustitución del modelo lineal de producción, en el cual el recurso es extraído de la naturaleza, transformado industrialmente en producto, utilizado y, finalmente descartado al final de su vida útil (John y col., 2009). Objetiva el empleo sostenible de los recursos naturales, convirtiendo la vida útil lineal de los materiales de construcción en una vida cíclica. Denominado de ciclo cerrado por Curwell y Cooper (1998), este modelo incentiva el uso optimizado de los recursos naturales, la reducción de la generación de residuos y el reciclaje de los residuos inevitablemente producidos.

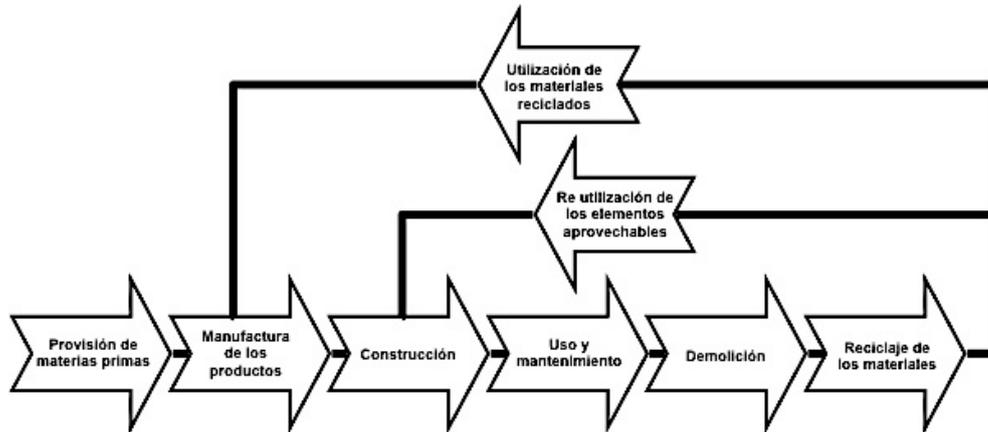
Respecto al reciclaje de residuos, es muy importante que el proceso sea fácil y genere un producto cualitativamente igual al material convencional. Si la calidad del material reciclado es insuficiente y/o el proceso de reciclado es complejo y demanda mucha energía, el ahorro de CO<sub>2</sub> es poco importante.

El potencial de reciclaje del recurso se considera debido a la importancia que tiene en la obtención de un producto técnica y ambientalmente viable al final del ciclo de vida de la construcción. La calidad del material reciclado debe ser suficiente para permitir su uso en una aplicación relevante, produciendo un ciclo de vida cerrado. De preferencia se utilizará en una aplicación de igual nivel técnico y ambiental que la de origen.

En este sentido, el reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) para su aplicación como áridos reciclados en la Construcción Civil es una actividad fundamental para el desarrollo sostenible de esta industria. Esta actividad produce diversos beneficios ambientales (reducción del volumen de extracción de materias primas, del consumo de energía, de emisiones de CO<sub>2</sub>, de la contaminación generada y de la disposición inadecuada de residuos potencialmente reciclables en vertederos). Además, el reciclaje de RCD permite el cierre del ciclo productivo de la construcción

civil, visto que el proceso de producción de áridos reciclados es similar a la producción de áridos convencionales y puede proporcionar materiales para uso en la misma industria.

Hendriks y Janssen (Hendriks y Janssen, 2004) reafirman tal concepto, indicando una nueva visión del ciclo constructivo “Building Cycle” vinculada a esta actividad (Figura 1.2).



**Figura 1.2. Modelo del “Building Cycle” (Janssen, 2007)**

Aumentar y garantizar la durabilidad de una construcción también es muy importante para minimizar sus impactos ambientales y alcanzar su sostenibilidad.

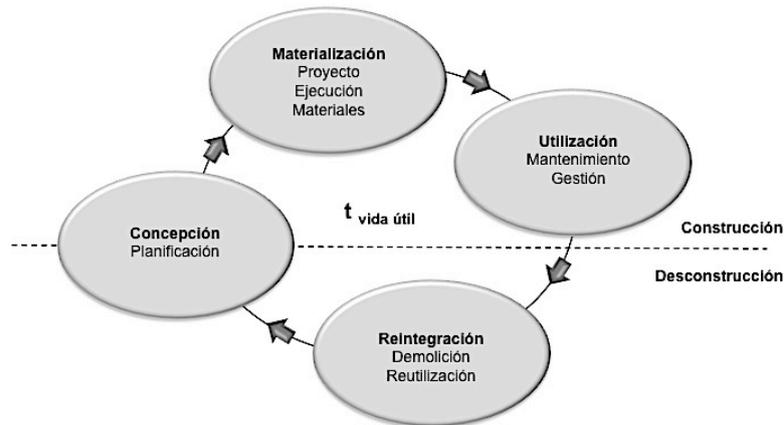
De hecho, el propio concepto de sostenibilidad está vinculado con la durabilidad. En algunos países como Alemania, Finlandia, Rumania y Francia, la traducción de la expresión “construcción sostenible” es “construcción durable” (Bourdeau, 1999 citado por John y col., 2009).

El vínculo existente entre las palabras sostenibilidad y durabilidad tiene sentido, visto que al aumentar la vida útil de recursos, se aumenta su productividad (DeSimone y Poppof, 1998) y se minimiza la cantidad de residuos (John y col., 2009). Cuanto más durable sea una construcción, menores serán los impactos ambientales producidos a lo largo de su ciclo de vida. Debido a la mayor duración de la vida útil de lo construido, las actividades de extracción de materias primas y producción de residuos, existentes en el inicio y final del ciclo de vida de una construcción, tienen lugar en espacios de tiempo más prolongados.

Expresada por la distribución de la vida útil de un conjunto de elementos que componen una construcción, la durabilidad es decisiva. El aumento de la durabilidad de un determinado recurso no necesariamente implica en el aumento del impacto ambiental producido durante su etapa de producción. Por otro lado, el conocimiento de la vida útil permite informaciones relevantes para la toma de decisiones racionales relacionadas con aspectos económicos y ambientales del ciclo de vida del material (John y col., 2009).

En la figura 1.3, propuesta por Aguado y Casanova (1997) y corroborada por Martínez-Abella, (2011), los autores remarcan la importancia de explicitar la vida útil de una estructura, como parámetro previo y punto de partida. Mantienen la filosofía del ciclo constructivo, al incluir la etapa de reintegración, fortaleciendo los aspectos ambientales envueltos. Al mismo tiempo, este concepto reconoce una planificación más integrada de las distintas fases de la construcción y una articulación

satisfactoria entre sus interfases y entre sus límites, permitiendo identificar el grado de sostenibilidad de distintas soluciones para una misma situación (Aguado y col., 2003).



**Figura 1.3. Ciclo de vida de la construcción (Aguado y Casanova, 1997)**

Por otra parte, garantizar que los elementos que componen una construcción no generen impacto ambiental por contaminación al medio, es un punto determinante para su sostenibilidad.

El hecho que la construcción sea técnicamente adecuada a su uso, sea realizada y mantenida con recursos optimizados, reutilizados y reciclados, y que presente buena durabilidad no garantiza su sostenibilidad.

El principal aspecto ambiental de una construcción esta relacionado a la comprobación de que sus elementos son inertes, y, en consecuencia, no presentan sustancias peligrosas en cantidad suficiente para generar algún daño ambiental. Es fundamental que los elementos que componen la construcción no produzcan contaminación al medio.

En ese contexto, las acciones que tienen como objetivo la sostenibilidad en la construcción civil deben tener carácter progresivo. Deben basarse en métodos productivos sostenibles que permitan la optimización del uso de los recursos utilizados, y que garanticen la seguridad ambiental del medio durante todas las etapas del ciclo de vida de la construcción.

Eso implica en la producción de estructuras construidas, mantenidas y operadas con el mínimo de recursos posibles, y que pueden ser fácilmente mejorados o reformados. El proceso de demolición debe ser realizado solo cuando la estructura ya no pueda más ser utilizada. En el proceso, los componentes aprovechables deben ser reutilizados y los no aprovechables deben ser reciclados (John, 2000).

Adicionalmente, se debe garantizar que todos los materiales utilizados, reutilizados, reciclados y/ desechados no produzcan, a lo largo de su vida, emisiones de sustancias que puedan generar algún tipo de contaminación al medio.

La figura 1.4 presenta el esquema del ciclo de vida de una construcción, donde se indica cuando y cuales son las acciones sostenibles que se deben llevar a cabo para garantizar su sostenibilidad.

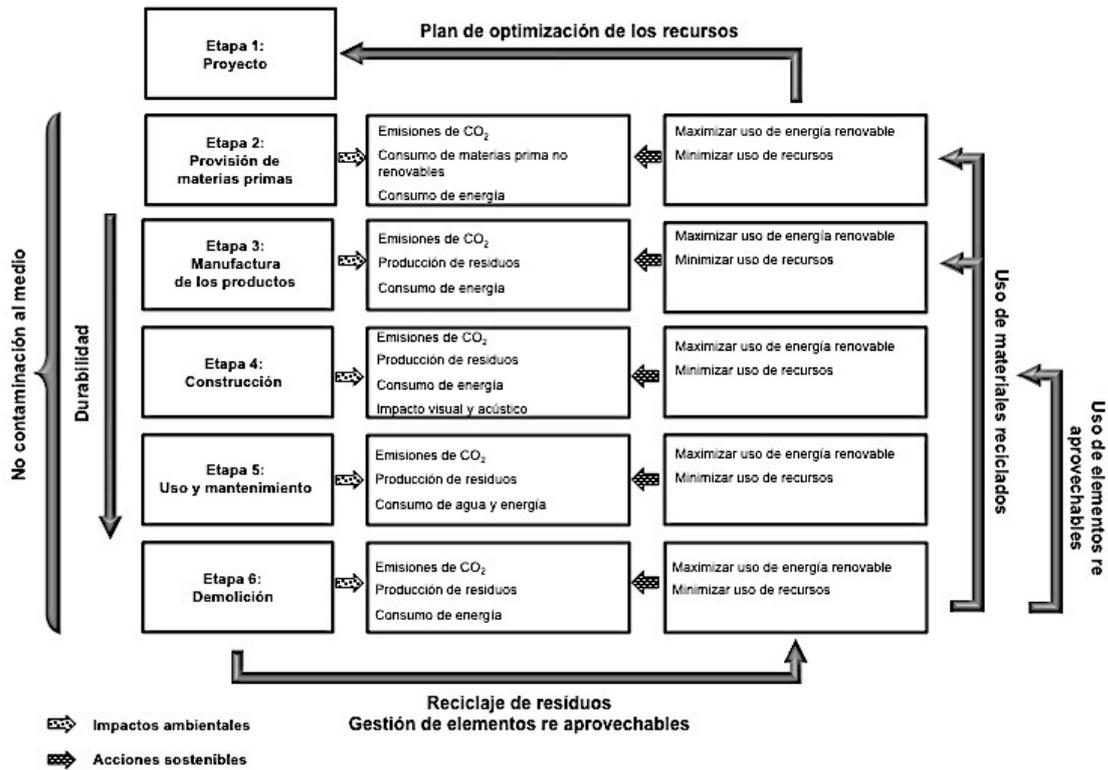


Figura 1.4. Acciones sostenibles aplicadas ciclo de vida de una construcción

### 1.1.2 HORMIGONES COMO MATERIALES SOSTENIBLES

La adopción de materiales duraderos, que necesiten poco mantenimiento y que puedan reutilizarse, reciclarse o recuperarse tienen una importancia fundamental en la ejecución de una construcción sostenible. Se consideran materiales de construcción sostenibles, aquellos que presentan (Construpedia, 2009):

- Larga duración
- Facilidad para ajustarse a un determinado modelo
- Justa producción
- Coste accesible
- Valorización
- Ausencia de contaminación al medio
- Poca necesidad de consumo de energía en su ciclo de vida
- Valor cultural en su entorno
- Fuentes abundantes y renovables
- Porcentaje de material reciclado.
- Ausencia de materiales de aislamiento que contenga CFC.

Entre todos los materiales de construcción existentes, el hormigón es considerado uno de los más importantes. De acuerdo con Levy y Helene (2002), el hormigón hace parte de la historia de las civilizaciones, por lo menos, desde hace 5.000 años. Utilizado en la mayoría de las obras en el mundo, es considerado uno de los materiales de construcción con más versatilidad y confiabilidad.

Según Burón Maestro (2007), el hormigón, cuando está bien ejecutado, es un material sostenible, visto que:

- Proporciona inercia térmica a la construcción, reduciendo la demanda energética del usuario al largo de su vida útil;
- Tiene una vida útil muy larga;
- Presenta elevada resistencia última al fuego, resultando en mayor seguridad a los usuarios y sus patrimonios y evitando daños colaterales de importancia social;
- Asegura adecuado confort acústico al usuario y reduce el consumo de otros materiales;
- Demanda poco mantenimiento, resultando en pocos gastos durante la vida útil de la construcción;
- Tiene un buen potencial para reciclaje, al final de su vida útil.

Respecto a la contaminación del medio, el hormigón también es considerado sostenible, visto que es un material no contaminante. De hecho, existen estudios que indican buenos resultados de uso del hormigón como encapsulador de residuos contaminantes (LEMaC, 2003; Sota y Barreda, 2006).

Teniendo en cuenta específicamente las materias primas utilizadas para la producción del hormigón, se pueden llevar a cabo acciones adicionales para aumentar la sostenibilidad del producto y reducir significativamente el balance de consumos e impacto ambiental en la etapa de producción:

- Agua: Uso de fuentes de agua alternativas preparadas adecuadamente (agua de las tormentas, grises, pluviales y de efluentes tratados), durante el procesado industrial.
- Cemento: Uso de cemento producido en condiciones sostenibles: cumplimiento del protocolo de Kyoto; uso de materiales reciclados (como componente (adiciones) o combustibles alternativos); gestión y valorización de residuos generados; control por sistemas de gestión medioambiental, prevención y minimización de riesgos laborales, entre otros.
- Acero (hormigones estructurales): Uso de acero producido en condiciones sostenibles.
- Áridos: Uso máximo posible de áridos reciclados de RCD en sustitución de los áridos convencionales. La valorización de estos residuos completa su gestión, evita su disposición inadecuada en vertederos, reduce el uso de materias primas no renovables en el proceso y las emisiones de gases y, en definitiva, forma parte de cualquier política medioambiental integral responsable.

El uso de áridos reciclados en la producción de hormigones, en especial, es una acción sostenible de gran importancia, visto que permite el cierre del ciclo de vida constructivo de esos materiales. La aplicación del árido reciclado en usos más nobles, como es el caso del hormigón estructural, promueven un cierre ideal del ciclo de producción del árido reciclado y posibilitan su uso en el mismo nivel que el material original.

Un hormigón de carácter sostenible debe ser, por lo tanto, un hormigón reciclado, durable y no contaminante.

### 1.1.3 HORMIGONES RECICLADOS EN ESPAÑA

En España, el uso de hormigón en la construcción civil está bastante difundido y está incorporado a la cultura del país. De acuerdo con datos estadísticos de la Asociación Nacional Española Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP), en 2004 se produjeron 82,3 millones de metros cúbicos de hormigón en el país.

Por otro lado, la producción de hormigones con áridos reciclados también es incentivada. Diversos estudios científicos han sido y están siendo desarrollados en el territorio español, con el objetivo de consolidar esta práctica.

La investigación de los hormigones con áridos reciclados la inició el prof. Enric Vazquez a principios de los años 90. En 1996 se publicó la primera tesis en España sobre durabilidad de los hormigones con áridos reciclados, cuya autora fue la Dra. Marilda Barra. Ambos investigadores pertenecen a la Universitat Politecnica de Catalunya. Varias instituciones han venido trabajado posteriormente sobre el hormigón de áridos reciclados. Entre ellas destacan el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX, la Universitat Politècnica de Catalunya, la Universidad de La Coruña, la Universidad Politecnica de Valencia y la Universidad de Oviedo.

El reciclaje de residuos de construcción y demolición ya es una actividad consolidada en el país. Respecto a la oferta de áridos reciclados, según datos del GERD (Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrivos), se estima que existen cerca de 150 instalaciones fijas y cerca de 300 instalaciones móviles de producción de áridos reciclados, repartidos por todo territorio español.

La disponibilidad de productores de árido reciclado, en general y, principalmente, en las grandes ciudades, es lo suficientemente alta como para viabilizar el uso de este material en lo que se refiere a costes de transporte.

El país también dispone de planes y leyes que incentivan el uso de materiales reciclados en la construcción y en servicios públicos.

En España, el Ministerio de Medio Ambiente publicó en el año 2001 un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (PNRCD, 2001). Actualmente, se está desarrollando el II PNRCD, aplicado al período de 2008 a 2015. El II PNRCD parte de la experiencia adquirida en el desarrollo y aplicación del PNRCD. Como en el primero, el II PNRCD define las medidas para la prevención, reutilización, reciclado, valorización y eliminación de los RCD en España, incluyendo los medios de financiación y el procedimiento de revisión (PNIR 2008-2015, 2008).

Entre las Comunidades Autónomas, Cataluña se destaca por presentar una estructura de gestión y tratamiento de residuos de construcción desde 1994. Esta comunidad presenta actualmente un decreto regulador de los escombros y otros residuos de construcción, dos empresas públicas

destinadas a la gestión de residuos (Gestora de Runas de la Construcción, y Gestora Metropolitana de Runas), además de un programa de gestión de RCD, denominado Programa de Residuos de la Construcción en Cataluña, 2007-2012 (PROGROC, 2007).

El uso de áridos reciclados para la producción de hormigones estructurales en España es contemplado en la “Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)”. De acuerdo con este documento, el único tipo de árido reciclado que se acepta para la producción de hormigón estructural es el producido a partir de residuos de hormigón estructural. En estas recomendaciones también se indican valores límites para las impurezas que puedan producir efectos negativos sobre la resistencia y durabilidad de los áridos.

En el Anejo 15 (“Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados”) se aconseja que el uso de árido reciclado se limite a las fracciones gruesas. También se recomienda un límite máximo de 20% de sustitución del árido grueso convencional, para mantener las propiedades mecánicas mínimas necesarias.

En el Anejo 18 de este mismo documento (“Hormigones de uso no estructural”) se sugiere que el porcentaje de sustitución de árido grueso puede aumentar hasta el 100%, para hormigones no estructurales.

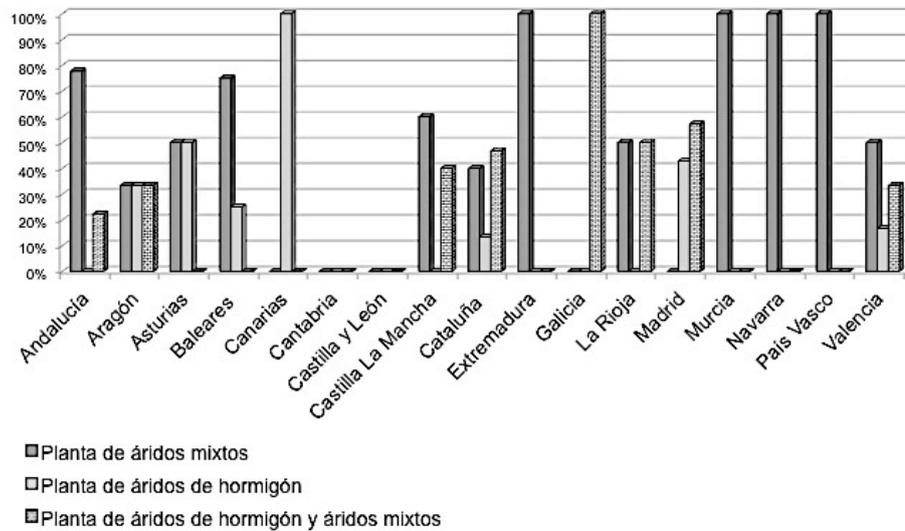
Sin embargo, a pesar de que se están llevando a cabo en España importantes acciones en el ámbito tanto de la normativa como de la investigación del uso de áridos reciclados de RCD en hormigones, faltaría concretar una acción más amplia destinada a analizar la viabilidad de uso de áridos reciclados mixtos (compuestos por una mezcla de elementos pétreos, de hormigón y cerámicos) en esta aplicación.

Muchas normativas para la producción de hormigón estructural, incluyendo la española, no admiten los áridos predominantemente cerámicos. Se supone que su empleo puede provocar una relación agua/cemento (a/c) mayor y un aumento de la porosidad. En consecuencia, pueden generarse efectos negativos importantes en la resistencia a compresión y en el módulo de elasticidad del hormigón reciclado producido, además de problemas relacionados con su durabilidad.

En contrapartida, el residuo cerámico es el más numeroso entre los residuos de construcción y demolición. La mayor parte de la producción de residuos (más de 50%) en Europa procede de la demolición (Lauritzen, 1994; Pera, 1996). Los residuos originados en la demolición de edificaciones presentan gran cantidad de materiales de albañilería, que contienen componentes cerámicos (ladrillos, bloques, tejas, placas de revestimiento etc.), además de mortero y hormigón.

Según datos elaborados por la asociación GERD, obtenidos de la “Estadística anual de precios y tarifas del sector”, la producción de RCD en el año 2007 fue de 35 millones de toneladas. Estos residuos están formados principalmente por materiales cerámicos y de hormigón, y en menor proporción también están presentes otros materiales como madera, metales y plásticos.

La figura 1.5 presenta los resultados de un diagnóstico del sector, realizado por el Proyecto GEAR, con 67 plantas de reciclaje españolas, repartidas en las siguientes Comunidades Autónomas: Andalucía, Aragón, Asturias Baleares, Canarias, Cantabria, Castilla La Mancha, Castilla León, Cataluña, Extremadura, Galicia, La Rioja, Madrid, Murcia, Navarra, País Vasco y Valencia.



**Figura 1.5. Porcentaje de plantas de reciclaje estudiadas por el Proyecto GEAR por tipo de árido producido y comunidad (Proyecto GEAR, 2010)**

En el diagnóstico, se observa que la oferta de áridos reciclados mixtos es muy superior a la oferta de áridos reciclados de hormigón. Cerca de 54% de las plantas de reciclaje analizadas solo produce áridos reciclados de carácter mixto, mientras que cerca de 31% de las plantas producen los dos tipos de áridos. Finalmente, solo 15% de las plantas analizadas producen exclusivamente áridos reciclados predominantemente de hormigón.

Debido a la importante cantidad de residuos cerámicos producidos en las actividades de construcción y demolición, y considerando la dificultad técnica que representa separar los residuos de hormigón de los residuos cerámicos, es necesario incentivar estudios que permitan la valorización y optimización del uso de áridos reciclados mixtos.

#### 1.1.4 DURABILIDAD Y LIXIVIACIÓN COMO PARÁMETROS PARA MEDIDA DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS

La sostenibilidad es un parámetro relativo, utilizado para comparar el grado de sostenibilidad entre actividades y/o productos distintos aplicados a un mismo objetivo. Debe ser utilizado para identificar que actividad y/o producto tiene carácter más sostenible para la situación en análisis.

Debe basarse en referencias objetivas, y preferencialmente numéricas, tener carácter global, y considerar todas las circunstancias previsibles, integrando el máximo de aspectos valorables (Burón Maestro, 2007).

Esta tesis defiende el concepto de que la cuantificación de la sostenibilidad de hormigones con misma función estructural puede ser realizada a través de un proceso homogéneo, simplificado y comparativo. Este análisis puede limitarse a la evaluación de los factores determinantes del perfil medioambiental de esos materiales que se diferencian entre las situaciones en comparación.

La sostenibilidad de un elemento de hormigón, y incluso, de una construcción, es principalmente determinada por su comportamiento durante su uso y mantenimiento (Burón Maestro, 2007). La durabilidad y vida útil tiene mayor influencia en la sostenibilidad de un hormigón, que los materiales escogidos para su producción.

En contrapartida, para que el uso de hormigón reciclado en la construcción civil sea sostenible es necesario garantizar que el producto presente, dentre otros factores, propiedades mecánicas, de durabilidad y de lixiviación, que indiquen su uso seguro y duradero.

Por lo tanto, para el caso del análisis de hormigones reciclados, se consideran determinantes dos enfoques:

- Garantizar que el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones no genera ninguna contaminación ambiental al medio durante todo el ciclo de vida de la estructura;
- Comprobar que los hormigones reciclados producidos son tan durables como el hormigón convencional equivalente aplicado para la misma función.

Para el primer enfoque, el juicio basado en la lixiviación es considerado el más apropiado para determinar el impacto ambiental a largo plazo de áridos reciclados.

A través de un plan de control bien proyectado de ensayos de lixiviación, el comportamiento lixivante de esos materiales puede ser analizado a lo largo de toda su vida útil (desde su proceso de producción hasta su demolición, reciclaje o eliminación). En la selección de los métodos de ensayo a realizar debe considerarse tanto el conocimiento previo de los materiales, como las necesidades y características de cada etapa del ciclo de vida en análisis. Los resultados obtenidos para cada etapa pueden ser utilizados como indicadores de sostenibilidad.

En el caso del segundo enfoque, la durabilidad del hormigón debe estar relacionada con el conocimiento de su vida útil estimada. Para ello, se pueden aplicar modelos de previsión de vida útil pueden ser aplicados como herramientas de medida. La gran mayoría de los modelos existentes en la bibliografía analiza el transporte de agentes agresivos a la armadura por la aplicación de la 1ª y de la 2ª Ley de Fick. La selección de los métodos a aplicar en un análisis de sostenibilidad de hormigones debe ser bien planeado. Debe considerar tanto el conocimiento previo de los materiales, como las necesidades y características del proyecto.

Los detalles del proyecto que generen mayor protección al elemento (mayor recubrimiento, aumento de la resistencia, uso de cementos especiales, y otros) deben ser considerados en el análisis, ya que estos factores pueden aumentar la vida útil del elemento, sin alterar significativamente el perfil medioambiental del material (John y col., 2009).

En ese contexto, la presente investigación realiza el análisis / medida de la sostenibilidad de hormigones reciclados, a través del estudio de su durabilidad e impacto ambiental por lixiviación. Al considerar que estas características de un hormigón reciclados no necesariamente son equivalentes a las de un hormigón convencional producido en condiciones similares, el estudio propone:

- La evaluación del impacto ambiental por lixiviación de esos materiales, en todas las etapas de su ciclo de vida. El plan de control escogido se enfoca en el análisis y cuantificación de los contaminantes emitidos por los áridos gruesos utilizados en la producción de los hormigones, sean reciclados o naturales, y por los hormigones producidos con esos áridos. Los ensayos se escogen en función del conocimiento previo ya existente del material y de condiciones de escenario pre determinadas.
- El análisis y cuantificación de la durabilidad de esos hormigones, a través del uso de modelos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía, escogidos a partir de condiciones de escenario/proyecto pre determinadas. Los parámetros de análisis de estos indicadores están relacionados con la “capacidad” del hormigón de transportar agentes agresivos en su estructura.

Es importante destacar que el estudio propuesto hace el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados hechos tanto con áridos con predominio de elementos de hormigón como con áridos de carácter mixto.

Esta cuantificación se muestra como una herramienta imprescindible para consolidar la aplicación de áridos reciclados en hormigón como una solución práctica y sostenible para la industria de la construcción civil en España.

Desde un punto de vista global, este planteamiento espera atender la suma de intereses particulares de los distintos agentes que intervienen en el ciclo productivo de un hormigón reciclado (gestor de RCD, productor de árido reciclado, proyectista, constructor y usuario).

Con eso, se espera fomentar el uso en hormigón de áridos reciclados mixtos. El avance de estudios científicos en esta temática contribuye a la creación de modelos de decisión que apoyan la consolidación del uso de esos materiales en la Construcción Civil en el país.

## 1.2 OBJETIVOS

### Objetivo Principal

Determinar la sostenibilidad de uso de áridos reciclados procedentes de RCD en hormigón, mediante el análisis de su durabilidad, a través de la aplicación de modelos de previsión de vida útil, y la evaluación de su impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida, a través de ensayos de lixiviación.

## Objetivos Específicos

- Estudiar la adecuación técnica del uso de áridos reciclados de hormigón y de cerámica en la producción de hormigón;
- Evaluar la durabilidad y el impacto ambiental por lixiviación de hormigones producidos con áridos reciclados de hormigón y de cerámica;
- Determinar la influencia del contenido de cerámica en el árido reciclado mixto en cuanto a los aspectos técnicos, de durabilidad y de impacto ambiental;
- Valorar la sostenibilidad de los hormigones producidos, a través de un análisis comparativo basado en la aplicación de:
  - indicadores de durabilidad y vida útil, desarrollados a partir de modelos de previsión de vida útil de hormigones estructurales, y fundamentados en las propiedades de carbonatación y penetración de cloruros de esos hormigones;
  - indicadores de lixiviación, definidos a partir de los resultados presentados por el estudio de impacto ambiental por lixiviación de esos hormigones.

## 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento está dividido en 8 capítulos, conforme indicado a seguir:

En el **capítulo 1** se presenta la justificación de la realización de la investigación, la descripción de los objetivos generales y específicos y la estructura de la tesis.

En el **capítulo 2**, se presenta en detalle el desarrollo conceptual del problema tema de esta investigación. Se presenta la importancia del análisis de la durabilidad y del impacto ambiental para la medida de la sostenibilidad de hormigones y la importancia en hacer este análisis en hormigones hechos con áridos reciclados.

Por un lado, se presentan los principales parámetros que afectan la durabilidad y vida útil de hormigones. También se describe los diferentes modelos de previsión de vida útil de hormigones existentes en la actualidad, con el propósito de generar un estado del conocimiento de las diversas metodologías y de identificar los métodos que mejor presentan condiciones para aplicación al estudio propuesto.

Después, se afirma la necesidad de garantizar que los hormigones no generen contaminación al medio, presentando el estado del conocimiento acerca el análisis del impacto ambiental de hormigones por lixiviación de contaminantes. Los parámetros que deben ser considerados en un estudio de impacto ambiental por lixiviación de hormigones se presentan en este punto.

En este **capítulo 3**, se presenta el estado del conocimiento acerca las características de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, tanto de los áridos reciclados con

predominio de elementos de hormigón, como los de carácter mixto. También se presenta el conocimiento existente acerca hormigones hechos con áridos reciclados.

En el **capítulo 4**, se explica el plan de trabajo realizado y se presenta la caracterización de los materiales utilizados en la investigación. Dicho capítulo también presenta el plan experimental propuesto y la propuesta metodológica adoptada para el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados.

En el **capítulo 5**, se exponen y analizan los resultados obtenidos en la etapa experimental de este trabajo, mientras que en el **capítulo 6**, se definen índices y indicadores comparativos de sostenibilidad de hormigones reciclados a través del uso de modelos de previsión de vida útil y de resultados de ensayos de lixiviación. Se analiza la validez de aplicación de los indicadores en comparación a los resultados obtenidos en la etapa experimental y se mide la sostenibilidad de los hormigones analizados en el trabajo, a través de los índices desarrollados.

En el **capítulo 7**, se presentan las conclusiones finales de la investigación, presentando recomendaciones sobre las fortalezas y debilidades del trabajo, además de algunas direcciones interesantes hacia trabajos futuros de investigación relacionados con la presente tesis doctoral.

Por fin, en el **capítulo 8** se anotan las referencias y la bibliografía de apoyo para el desarrollo de esta tesis doctoral, así como las direcciones electrónicas que se consultaron.

## CAPÍTULO 2

# ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS POR DURABILIDAD Y LIXIVIACIÓN

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es una característica que indica la capacidad que una determinada actividad humana tiene para ser desarrollada permanentemente, consumiendo el mínimo posible de recursos naturales y permitiendo que las próximas generaciones puedan seguir desarrollándola. Se trata de un concepto bien amplio, donde la sostenibilidad es una expresión de responsabilidad social relacionada con el ahorro de los recursos naturales no renovables, con el respeto al medio ambiente y a lo largo del tiempo. Dentro de este concepto, se debe considerar los siguientes aspectos (Burón Maestro, 2007):

- de ahorro (energía, recursos, etc.)
- medioambientales (control de emisión de gases, valorización de residuos, etc.)
- sociales (generación de empleo, seguridad y salud en el trabajo, etc.)
- económicos (productividad, eficiencia, etc.).

El índice que cuantifica la sostenibilidad de una actividad o producto es obtenido por la división de la suma de todos los consumos e impactos generados durante su ciclo de vida por el tiempo de su vida útil. Cuanto menor sea este valor, mayor será la sostenibilidad de la actividad o producto. Este procedimiento de evaluación debe ser aplicado a todos los aspectos sociales, económicos, medioambientales y energéticos que influyen sobre la sostenibilidad. En cada evaluación se debe aplicar los coeficientes de ponderación necesarios. Del valor total, o agregado, se obtiene el índice de sostenibilidad del producto final evaluado.

En el caso de la cuantificación de la sostenibilidad de hormigones, esto significa analizar todo el ciclo de vida del producto. El hormigón tiene, a lo largo de su vida útil, un balance de consumos (gastos menos ahorros) y de impacto ambiental (deterioros menos correcciones) resultantes de la producción de sus materias primas, de su propia manufactura, de su uso y mantenimiento a lo largo de la vida útil y, finalmente, de su demolición.

Para estudiar, desde el punto de vista medioambiental, todas esas interrelaciones del ciclo de vida de un hormigón, es fundamental el uso de métodos fiables que valoren todas las acciones y sus respectivos efectos. Esos métodos deben permitir cuantificar todos los parámetros que influyen en la sostenibilidad del producto, sean de fácil o difícil cuantificación.

Los parámetros cuantificables (consumo de recursos, emisiones de gases y generación y valorización de productos) pueden ser tratados a través de modelos de base conceptual del análisis del ciclo de vida. Los parámetros de difícil cuantificación (riesgos potenciales, cambios geográficos, impacto visual y escasez de recursos), por otro lado, deben ser tratados con herramientas específicamente desarrolladas para este análisis (Álamo y col., 1998; Trinius, 1999).

El uso de más de una metodología para el análisis medioambiental de un producto o actividad admite analizar el problema en distintas formas. Valora los datos disponibles en distintos aspectos, siendo que, en algunos casos, de modo complementario. Y, finalmente, permite obtener diversas informaciones útiles para la toma de decisiones.

Además, dependiendo de cual sea el objetivo a evaluar, puede resultar más apropiado realizar el análisis medioambiental de modo simplificado. En este caso, se recomienda el uso de herramientas más específicas de evaluación ambiental.

### 2.1.1 METODOLOGÍAS PARA ANÁLISIS AMBIENTAL

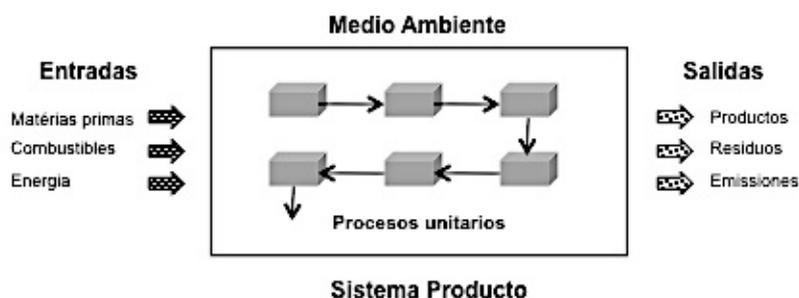
Existen diversas metodologías científicas disponibles en la actualidad para el análisis medioambiental de productos, procesos o servicios (Tabla 2.1).

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es considerado la herramienta más completa para el acompañamiento, bajo el aspecto ambiental, de un producto, proceso o servicio. Permite trazar el perfil medioambiental de su ciclo de vida, identificando alternativas de optimización de los procesos involucrados (Hendriks, 2000).

De acuerdo con la definición incluida en la norma IRAM-ISO 14040:1998, el Análisis del Ciclo de Vida es la "recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema durante su ciclo de vida". Comprende básicamente en la cuantificación y evaluación de las entradas (recursos como energía, materias primas, combustibles) y salidas impactos medioambientales como residuos y emisiones al aire, agua y suelo) asociados con el ciclo que se está evaluando (figura 2.1).

**Tabla 2.1. Aspectos generales de las principales herramientas disponibles actualmente para el análisis medioambiental (Carvalho Filho, 2001)**

Herramienta	Objetivos generales	Puntos fuertes	Puntos débiles
Análisis de riesgos ambientales	Valorar los efectos adversos asociados a una situación específica de riesgo y sus interrelaciones con la salud humana y el medio ambiente	Evalúa los efectos locales y regionales bajo condiciones específicas	Es capaz de consumir mucho tiempo y recursos No es capaz de apuntar la ubicación del riesgo a lo largo del ciclo de vida
Estudio de impacto ambiental	Evaluar los impactos positivos y negativos sobre el medio ambiente de un determinado proyecto planteado	Calcula tanto efectos positivos como negativos Considera los impactos locales de un proyecto	No es capaz de apuntar fácilmente la ubicación de un efecto global / regional o otros efectos a lo largo del ciclo de vida
Auditoría ambiental	Verificar la conformidad con determinados requisitos normativos vigentes, por medio de chequeo realizado por tercera parte	Proporciona una manera para que una tercera parte, independiente, compruebe los resultados	Enfoca una conformidad y enfatiza en término medio de más débil que de mejoría
Evaluación del comportamiento ambiental	Proporcionar una información fiable, objetiva y comprobable a cerca del desempeño medioambiental de una determinada organización	Promociona coeficientes de desempeño medioambiental asociándolos a políticas objetivas y metas preestablecidas	Promociona coeficientes de desempeño relativos y no absolutos
Análisis del flujo de sustancia	Contabilizar el suministro y la demanda de una sustancia específica que fluye a través del proceso de producción	Toma en consideración un impacto potencial determinado a lo largo del ciclo de vida	El enfoque sobre una única sustancia puede apuntar falsos resultados
Análisis de material y energía	Calcular el balance energético y material asociado con una operación específica	Promociona una vía estructurada de identificación y valoración de un impacto ambiental de operaciones, etc.	Enfoca solamente una fase del ciclo de vida
Gestión integral de sustancia	Calcular y reducir globalmente el impacto medioambiental de una determinada sustancia asociada	Permite hacer consideraciones integradas entre económicas y medioambientales en una misma herramienta	Emplea una valoración simplificada que puede dar respuestas demasíadamente simplificadas
Análisis de línea de producto	Evaluar potencialmente el impacto medioambiental, social y económico de un bien o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida	Integra aspectos medioambientales, económicos y sociales dentro de una sola herramienta	No puede valorar específicamente impactos locales
Análisis del ciclo de vida	Entender el perfil medioambiental de un sistema, identificando prioridad de mejorías y asegurándolas con fundamento en el ciclo de vida	Considera impactos global y regional Posibilita estimar los impactos que en términos influyen la salud de la sociedad	No es capaz de apuntar el carácter temporal o espacial de un determinado efecto



**Figura 2.1. Esquema del análisis del ciclo de vida (Hendriks, 2000)**

La tabla 2.2 presenta la descripción de las normas que pertenecen a la serie IRAM-ISO 14000, de acuerdo con las actividades incluidas en el proceso de Análisis del Ciclo de Vida de un producto.

**Tabla 2.2. El Análisis del Ciclo de Vida de acuerdo con la serie IRAM-ISO 14000**

Actividad	Norma Relacionada	Descripción
Definición de la meta y el alcance	IRAM-ISO 14040:1998	La definición de la meta apunta a establecer concretamente para qué y por qué se desea hacer el ACV, y a quién o a quiénes se va comunicar los resultados que se obtengan del estudio.
Análisis del inventario	IRAM-ISO 14041:2000	Esta fase implica la recolección y la cuantificación de las entradas y salidas de materia y energía correspondientes del sistema producto bajo estudio durante su ciclo de vida. Tales entradas y salidas comprenden, entre otras, materias primas, insumos, material auxiliar, combustibles, carbón, derivados del petróleo, madera y energía eléctrica; emisiones al aire, al agua y al suelo; ruidos, vibraciones, radiaciones y calor. El proceso de recolección de los datos vinculados con esas entradas y salidas es el núcleo principal de esta fase.
Evaluación del impacto	IRAM-ISO 14042:2000	Esta fase tiene por finalidad conocer y evaluar la magnitud y la significación de los impactos ambientales potenciales que podrían originarse por el funcionamiento del sistema producto bajo estudio. La evaluación se realiza tomando como base los datos obtenidos en la fase de análisis del inventario. Se subraya el adjetivo potenciales pues en realidad esta fase no permite conocer ni estimar la significación de los impactos ambientales reales o efectivos derivados del sistema producto que se estudia.
Interpretación	IRAM-ISO 14043:2001	Es la fase que cierra el ACV, y tiene suma importancia en lo concerniente a "la exactitud" y "la transparencia" del estudio de ACV realizado, dos puntos que son de interés para quienes deseen conocer los detalles referidos a las suposiciones adoptadas en los casos en que, por ejemplo, se careciera de datos, o se los hubiera extraviado o no estuvieran disponibles en el momento oportuno. En ella se utilizan herramientas tales como las verificaciones de integridad, sensibilidad y coherencia de los datos.

Cualquiera de los otros estudios citados en la tabla 2.1 corresponderá a evaluaciones fragmentadas de impactos ambientales causados en diferentes etapas del ciclo de vida.

Sin embargo, se debe resaltar que el Análisis del Ciclo de Vida no es siempre aplicable a todas las situaciones de evaluación ambiental. En algunos casos, métodos de Evaluación de Impactos Ambientales, Análisis de Riesgos Ambientales o Auditoras Ambientales son más apropiados para un análisis ambiental más específico.

Mientras el Análisis del Ciclo de Vida considera desde los productos y los servicios hasta las políticas y, incluso, las estrategias de todo el ciclo de vida del elemento analizado, los demás métodos enfocan su análisis a los efectos de un proceso, producto o servicio individualizado. Por tal motivo,

estos métodos son más aplicables a estudios que objetivan el análisis del comportamiento ambiental de un producto o etapa.

Si el objetivo de un estudio es analizar el perfil medioambiental de un producto, las herramientas más adecuadas son las del Análisis del Ciclo de Vida. A través de este estudio se podrá identificar en qué etapas o procesos es más conveniente reducir la contaminación generada durante todo el ciclo de vida del producto.

Por otro lado, para estudios que objetiven la reducción de la contaminación generada en una única etapa del ciclo de vida del producto, la metodología indicada es la Auditoría Ambiental.

Si el objetivo del estudio es obtener informaciones para reducir el riesgo que una determinada empresa puede generar sobre los ecosistemas de su entorno, se consideran más convenientes las herramientas de Evaluación de Impactos Ambientales.

Métodos de análisis de riesgo, a su vez, se indican para estudios que objetivan el análisis del daño o riesgo ambiental que un producto puede producir en determinada actividad.

### 2.1.2 ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS

Los hormigones, como cualquier otro producto, presentan varios aspectos medioambientales cuantificables a lo largo de su ciclo de vida. El Análisis del Ciclo de Vida, por lo tanto, puede ser una buena herramienta para medir la sostenibilidad de hormigones.

Según la metodología expresada en la serie IRAM-ISO 14000, este análisis incluye la realización del inventario de todos los elementos consumidos y generados en todas las etapas del ciclo de vida del hormigón. Eso significa cuantificar el cemento, los áridos, el agua y la energía consumidos (entradas) y cuantificar los residuos, efluentes y emisiones generados (salidas).

Se analizan las oportunidades de reducción de la generación de residuos y del consumo de materias primas y energía de forma sistemática, con el objetivo de relacionar el destino de materiales y de su transformación en producto por medio de varios procesos. Un inventario completo aporta la información suficiente para medir la sostenibilidad global de este material.

Sin embargo, el Análisis del Ciclo de Vida fue desarrollado con objetivos generales, con el fin de adecuarse a cualquier tipo de producto o servicio. Como no fue desarrollado para materiales de construcción, varios aspectos específicos a hormigones deben ser considerados.

La evaluación de los parámetros ambientales de un hormigón es un proceso complejo. En él intervienen muchos elementos combinados en diferentes operaciones y etapas a lo largo de su vida útil (Díaz y col., 2010).

El comportamiento del hormigón a lo largo de su ciclo de vida tiene carácter variable. Esta variabilidad de comportamiento del hormigón, originada por algunos factores intrínsecos al propio

producto, se refleja en su análisis medioambiental. El perfil medioambiental de un hormigón es variable en función de (Carvalho Filho, 2001):

- La composición del material: el hormigón mezcla diferentes materiales (cemento, áridos, agua y adiciones), en cantidades que varían de acuerdo con las propiedades específicas que se desean obtener.
- Las condiciones de producción, transporte, puesta en obra y acabados: Estos factores son variables en función de las condiciones específicas de uso del hormigón. En consecuencia, el consumo de energía es variable.
- El mantenimiento: En general, el hormigón necesita poco mantenimiento. Sin embargo, cuando necesita acciones de recuperación, pueden llegar a consumir grandes cantidades de material y energía, que deben ser cuantificados en un proceso de análisis medioambiental.
- El destino final de los residuos generados: Las actividades de reutilización y reciclaje de los residuos de construcción y demolición (RCD) son procesos todavía no consolidados en el sector de la construcción civil. La gestión de los RCDs generados al final de la vida útil del hormigón puede ser realizada de distintos modos, que pueden generar más o menos impacto ambiental al proceso de demolición. Desde el simple desecho de los residuos generados hasta el máximo de reutilización y reciclaje de los materiales a usos equivalentes al original, el proceso de gestión de residuos puede generar cargos ambientales muy variables.

En el caso concreto de análisis de estructuras de hormigón, Trinius (1999) recomienda que la metodología de análisis sea hecha inicialmente en fases o componentes de su ciclo de vida escogidas en función de su importancia en el perfil medioambiental del producto. El autor considera necesario avanzar en este conocimiento hasta el dominio de estos aspectos, para, solo entonces, actuar sobre el ciclo de vida completo.

Por otro lado, como no existen actividades absolutamente sostenibles, la sostenibilidad es un parámetro relativo, utilizado para comparar si una actividad es más o menos sostenible que otra (Burón Maestro, 2007).

El proceso de cuantificación de la sostenibilidad de actividades o productos equivalentes, pero distintos, puede ser realizado por un proceso homogéneo y comparativo, que parte de la premisa que ambas actividades o productos tienen el mismo objetivo. El uso de herramientas más específicas de evaluación ambiental, como indicadores, puede ser lo suficiente para la toma de decisiones.

En ese contexto, es importante citar la metodología propuesta en el anejo 13 de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE, 2008), para determinar el nivel de sostenibilidad de una estructura de hormigón. En ella se propone inicialmente el cálculo del Índice de Sensibilidad Medioambiental (ISMA) para estructuras de hormigón. Obtenido a partir de diversos indicadores, este índice considera tanto la clasificación medioambiental de las instalaciones como los criterios medioambientales de caracterización del hormigón y de las armaduras, de optimización del armado, de optimización del acero para armaduras, de sistemática del control de ejecución, de optimización del cemento, de optimización del hormigón, de control de los impactos, de gestión de los residuos y de gestión del agua.

El Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (ICES) es calculado a partir del ISMA obtenido y de coeficientes predeterminados de contribución social y de contribución por extensión de la vida útil de la estructura en análisis.

La metodología propuesta por la EHE (2008) es bastante completa y considera prácticamente todos los factores ambientales que son afectados por una estructura de hormigón.

Sin embargo, se debe resaltar que, en el ámbito de una evaluación comparativa entre situaciones similares, el análisis de la sostenibilidad puede limitarse al análisis de los principales parámetros que influyen el perfil medioambiental de los productos. En una evaluación simplificada, se descartan los parámetros considerados de igual carga ambiental entre las situaciones en análisis y solo se considera los factores determinantes que se diferencian en el contexto ambiental.

Bien planificada, una evaluación más simple proporciona suficiente detalle para orientar una toma de decisiones direccionada a mejorar la sostenibilidad del producto y/o proceso en análisis, comprendiendo en una verificación rentable y viable para la práctica diaria.

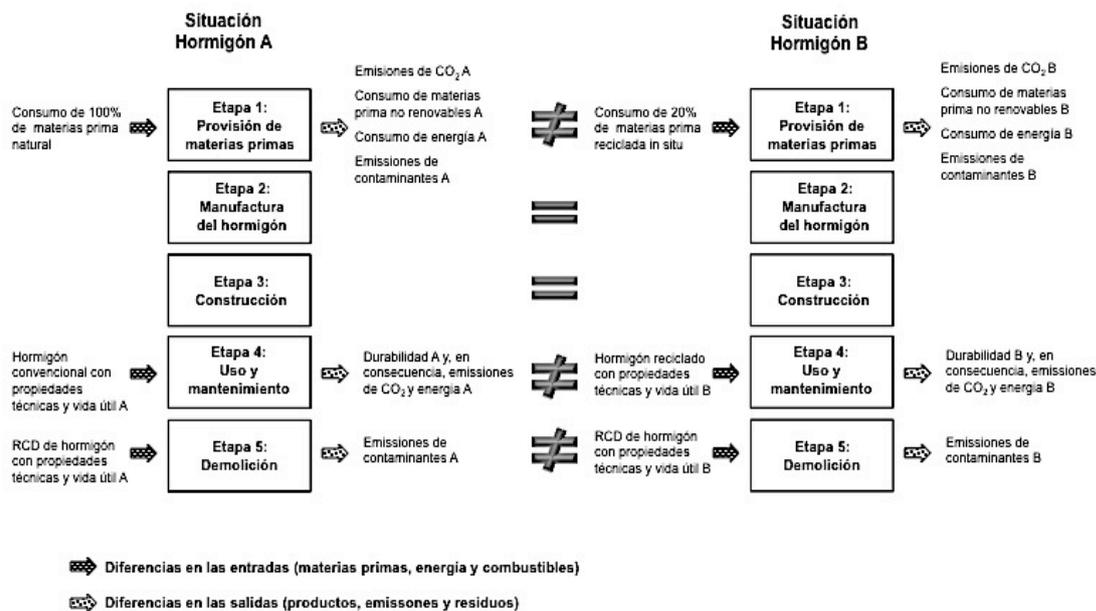
Como ejemplo de una evaluación simplificada, dentro del enfoque propuesto en este trabajo, se presenta la siguiente situación hipotética: el análisis de la sostenibilidad de dos tipos distintos de hormigón, denominados hormigón A y hormigón B.

En esta hipótesis, ambos productos poseen objetivos y modo de producción iguales. Se considera que la principal diferencia entre ambos hormigones se encuentra en la materia prima utilizada. Mientras el hormigón A utiliza 100% de árido grueso convencional, proveniente de una cantera situada a 10 km de la obra, el hormigón B utiliza 20% de árido grueso reciclado, producido “in situ”, en sustitución al árido convencional.

Se parte de la premisa que los dos hormigones tienen la misma dosificación y que, a través de ella, obtendrán resistencias equivalentes. Como el hormigón reciclado B solo presenta el uso de 20% de árido reciclado, se considera viable que la dosificación de ambas mezclas sea equivalente. En consecuencia, las cargas ambientales presentadas por las demás materias primas utilizadas en la producción de ambos hormigones (cemento, agua, acero y aditivos) pueden ser consideradas prácticamente iguales. Esta información es corroborada por la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE, 2008), que permite el uso de hasta 20% de árido grueso reciclado en la producción de hormigón en masa y armado, con base a ciertas condiciones de origen y composición del material reciclado. Se considera que los hormigones utilizados en el ejemplo atienden a todas las exigencias indicadas por la referida instrucción.

En esta situación, el objetivo es claramente identificar cual alternativa es la más sostenible. El proceso de análisis pasa a ser más sencillo. El análisis se limita a evaluar los parámetros ambientales de las etapas que presentan diferencias entre las dos situaciones.

La figura 2.2 hace un esquema del ciclo de vida de ambas situaciones.



**Figura 2.2. Análisis comparativo del balance de entradas y salidas ambientales de un hormigón convencional y un hormigón con 20% de árido reciclado**

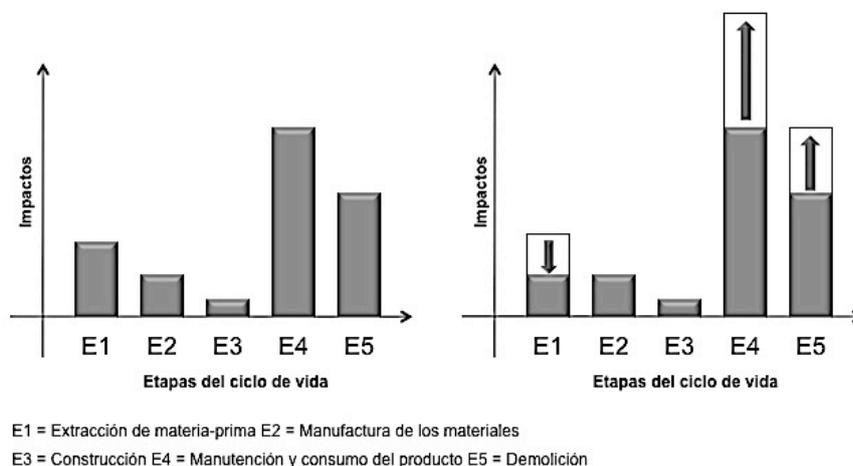
En ella, se indica las etapas en que se identifican diferencias entre entradas y salidas a cuantificar:

- Etapa 1: Para cada caso, se hace una provisión distinta de áridos. Por no utilizar material reciclado, inicialmente se considera que el hormigón A genera una carga ambiental superior al hormigón B: el proceso de provisión de materias primas del hormigón B, además de minimizar el uso de recursos naturales, también tiende a generar menos emisiones de CO<sub>2</sub>. Por utilizar un material reciclado producido “in situ”, la Etapa 1 del hormigón B también produce menos costes de transporte de material. Por otro lado, el balance de recursos y salidas del proceso de producción de los áridos no es considerado significativo. Se asume que el proceso de producción de áridos reciclados es bastante similar al proceso de producción de áridos naturales, ya que se trata de un tratamiento “in situ”, y los equipos utilizados en el tratamiento del RCD son similares a los utilizados en la industria minera (ver capítulo 3). Por último, respecto al impacto ambiental de los áridos, es fundamental verificar si el árido genera contaminación al aire, agua o suelo. Como el árido reciclado tiene una composición distinta del árido convencional (es compuesto por una mezcla heterogénea de elementos pétreos, de hormigón, mortero y cerámica), es necesario comprobar si él no contamina el ambiente.
- Etapas 2 y 3: En cada situación, el hormigón producido presenta una mezcla diferente de materiales. Por otro lado, esta diferencia no influye de modo significativo su manufactura, ni su proceso de puesta en obra.
- Etapa 4: Durante la etapa de uso y mantenimiento, el principal aspecto que debe ser considerado es la durabilidad del hormigón. Cuanto menor sea la durabilidad del hormigón, menor será su vida útil y, consecuentemente, mayor serán las consecuencias negativas de carácter ambiental generadas por el (mayor uso de recursos y mayor producción de emisiones). Por eso, desde un punto de vista ambiental, la vida útil de una construcción debe ser lo más larga posible. En cada situación, el hormigón presentará propiedades técnicas particulares. Es

necesario, en esta etapa, evaluar si la vida útil del hormigón A es equivalente a la vida útil del hormigón B. Por otro lado, otro punto ambiental que puede diferir entre las dos situaciones es la emisión de contaminantes. Es necesario comprobar si los hormigones producidos con materiales reciclados generan contaminación.

- Etapa 5: En las dos situaciones, los procesos de demolición, reciclaje y/o disposición final disponibles son iguales. El mayor o menor impacto ambiental generado en esta etapa dependerá del modo de gestión de RCDs adoptado en cada situación. Teniendo en cuenta que la gestión adoptada será la misma en ambas situaciones, se asume que el balance de recursos y emisiones del proceso es igual para las dos. El único punto que puede diferir está relacionado a la eventual emisión de contaminantes del material que será tratado o destinado a vertedero, ya que para cada situación, la composición del RCD es distinta.

De un modo global, la principal cuestión a verificar es si el uso del árido reciclado en la producción de un hormigón genera transferencia de impactos entre las fases (figura 2.3).



**Figura 2.3. Esquema de una situación de transferencia de contaminación entre fases del ciclo de vida de un hormigón por cambio de materia prima**

La determinación de parámetros o indicadores puede ser útil para evaluar el problema. Considerando los principales aspectos ambientales divergentes entre las dos situaciones, se podría definir una gran variedad de indicadores como, por ejemplo, los presentados a continuación:

- Porcentaje de reciclado: Porcentaje de material reciclado utilizado en cada situación;
- Emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte: Suma de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte de la materia prima hasta el local de manufactura del producto;
- Energía de producción: Suma total del combustible utilizado para la extracción / producción de la materia prima;
- Vida útil: Tiempo que el material permanece en la actividad para la que ha sido diseñada;
- Emisiones totales: Cantidad total de un contaminante emitido por unidad de peso del producto;
- Total de residuos peligrosos: Cantidad total de residuos peligrosos emitidos por unidad de peso del producto.

Es importante destacar que para el análisis de la sostenibilidad de un hormigón, el balance de consumos e impacto ambiental debe considerar, a corto plazo, las etapas 1 a 3 del ciclo de vida del producto, y, a largo plazo, las etapas 4 y 5 (figura 2.3). Debido a la elevada vida útil de un hormigón, el balance de consumos e impacto ambiental generados durante las etapas 4 y 5 tienen una importancia cuantitativa muy superior al balance total presentado en las etapas 1 a 3.

La sostenibilidad de un elemento de hormigón, y incluso, de una construcción, es principalmente determinada por su comportamiento durante su uso y mantenimiento (Burón Maestro, 2007). La durabilidad y vida útil, por lo tanto, es un indicador de extrema relevancia para medir la sostenibilidad de un hormigón.

La durabilidad de una construcción está mejor relacionada con el conocimiento de la vida útil estimada de sus componentes y de aspectos adicionales del proyecto que con el propio recurso. Cambios en los detalles del proyecto de una estructura de hormigón, por ejemplo, que generen mayor protección al elemento (mayor recubrimiento, aumento de la resistencia, uso de cementos especiales, y otros), pueden aumentar la vida útil del elemento, sin alterar de modo significativo el balance de consumos e impacto ambiental de las etapas a corto plazo (John y col., 2009).

Por otro lado, la emisión de contaminantes por lixiviación es otro indicador determinante de medida de la sostenibilidad de hormigones, principalmente en lo que se refiere al análisis de uso de materiales de construcción de carácter heterogéneo, como el árido reciclado. Según Van der Sloot y col. (1997), muchos autores defienden la relevancia de la evaluación de impacto ambiental por lixiviación para materiales de construcción.

El valor de emisiones generadas por un material de construcción puede ser mensurado para todo el periodo de vida útil de un material de construcción, a través de ensayos de laboratorio o a través del análisis de su estructura en campo, lo que proporciona una evaluación precisa del potencial de contaminación ambiental de esos nuevos materiales.

Los puntos siguientes del presente capítulo se enfocan, respectivamente, en los aspectos de la durabilidad y de la evaluación de impacto ambiental por lixiviación para el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados.

## 2.2 LA DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL COMO INDICADORES DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

En la bibliografía mundial se puede encontrar varias definiciones para el término durabilidad (Tabla 2.3). Desde definiciones implícitas que pueden generar interpretaciones muy amplias, hasta definiciones más completas y técnicas que consideran determinadas características físicas y químicas del hormigón.

**Tabla 2.3. Algunas definiciones de durabilidad**

Referencia bibliográfica	Definición de Durabilidad
Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (1988)	La calidad que los hormigones poseen de soportar las condiciones para la cual fueron proyectadas sin sufrir deterioraciones durante su vida útil de proyecto
ACI 210.2R-01 (2001)	La capacidad de una estructura de conservarse en determinado estado, resistiendo a las acciones de las intemperies, a los ataques químicos, a la abrasión o otro proceso de deterioro, previstas, según la norma NBR 6118 y definidas en conjunto por el autor del proyecto estructural y el contratante, en el inicio de los trabajos de elaboración del proyecto
NMX-C-403-ONNCCE-1999 (1999)	La capacidad del hormigón hidráulico para uso estructural de resistir durante un tiempo determinado la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro para mantener su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.
ACI 365.1R-00 (2000)	La capacidad de mantener la serviceabilidad de un producto, componente, ensamble o construcción durante un tiempo especificado.
ABNT NBR 6118 (2002)	La capacidad de la estructura de resistir las influencias ambientales previstas y definidas en conjunto por el autor del proyecto estructural y el contratista desde el inicio de los trabajos de elaboración del proyecto.
Mather (2004)	...el hormigón es “durable” si, en su medio ambiente, presente la vida útil deseada, sin costes excesivos de mantenimiento y reparación debido a degradación o deterioro...
EHE (2008)	La capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Según Mendoza-Rangel y Castro-Borges (2009), las definiciones actuales para durabilidad, sean implícitas o explícitas, pueden generar varias interpretaciones, visto que, naturalmente, cada definición está sujeta a las restricciones de lenguaje, semántica y costumbres de su país de origen.

De un modo general, los conceptos identificados apenas consideran el factor ambiental de la durabilidad. Las normas y bibliografías no incluyen claramente todos los factores físicos, químicos, mecánicos, biológicos y ambientales que deben ser considerados.

Por otro lado, algunas de estas definiciones hacen referencia a la vida útil del material (Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1988; Mather, 2004; EHE, 2008), cuya definición también presenta distintas interpretaciones en la bibliografía (Tabla 2.4).

Para el uso de la durabilidad como un indicador de sostenibilidad, se interpreta el término durabilidad como la capacidad del hormigón de mantener **sus características esenciales** frente a **diversas acciones agresivas y degradantes** a su estructura, por un periodo de tiempo específico, denominado vida útil.

Las características esenciales del hormigón están relacionadas a las condiciones de seguridad, funcionalidad y estética. Estos condicionantes delimitan el punto en el cuál la estructura ha alcanzado el final de su vida útil.

**Tabla 2.4. Algunas definiciones de vida útil**

Referencia bibliográfica	Definición de Vida útil
CEB / FIP (1990) citado por Helene (1997)	El periodo de tiempo en el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales ha sido proyectada sin la necesidad de intervenciones no previstas en el proyecto
DURAR Network (1997)	El periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva los requerimientos de proyecto en términos de seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento
CPD 93/68/EEC (1993)	El periodo de tiempo durante el cual el desempeño de los trabajos estará manteniéndose a un nivel compatible con el cumplimiento de los requerimientos esenciales.
EHE (2008)	El período de tiempo, a partir de la fecha en la que finaliza su ejecución, durante el que deben mantenerse las exigencias básicas en unos límites aceptables. Durante ese período requerirá una conservación normal, que no implique operaciones de rehabilitación.
ACI 365.1R-00 (2000)	El periodo de tiempo después de la instalación, durante el cual todas las propiedades exceden los valores mínimos aceptables con mantenimiento rutinario.
CIB W080/RILEM 175 SLM. (2004)	El punto en el tiempo, cuando la función prevista no se cumple.

Las acciones agresivas y degradantes, en cuestión, son variables. Dependen de una mezcla de variables relacionadas con los métodos de producción, los materiales utilizados y el ambiente en que el hormigón se encuentra. Deben limitarse a las acciones físicas, químicas, mecánicas, biológicas y ambientales que pueden incidir directamente en la estructura de hormigón en análisis.

Respecto a la vida útil, es importante resaltar que su conceptualización y definición objetiva debe considerar por lo menos tres situaciones distintas (Helene, 1993). Estas situaciones contemplan principalmente los aspectos relacionados con el fenómeno de corrosión de la armadura, adoptado por este autor como el fenómeno mas frecuente, importante y conocido científicamente.

En ese contexto, se observa que los principales agentes agresivos para el hormigón existentes en el medio son:

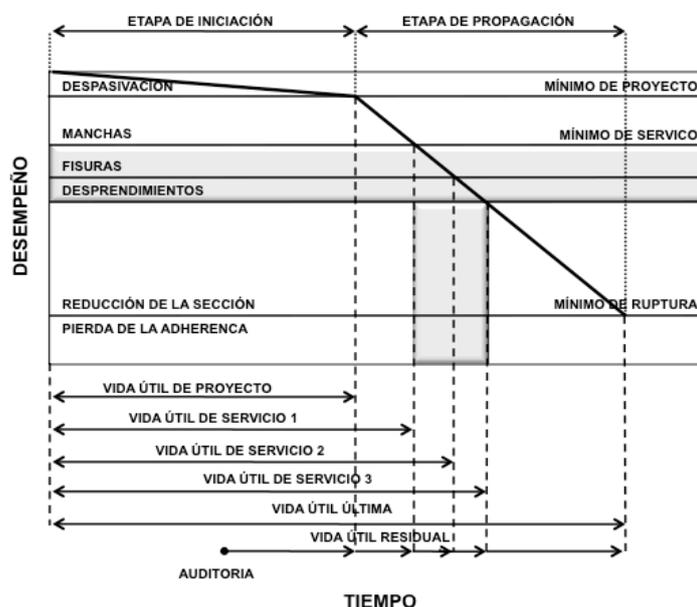
- el cloruro  $Cl^-$ , responsable por el ataque directo a la armadura, por su despasivación y posterior corrosión;
- el gas carbónico  $CO_2$  y los ácidos, que atacan el hormigón, provocando la reducción de su pH, y, por consecuencia, contribuyen para la despasivación de la armadura;
- los sulfatos y la propia reacción álcali-árido, que generan productos expansivos que destruyen el hormigón y, consecuentemente, la protección a la armadura, creando una situación posterior susceptible a la despasivación de la armadura.

Considerando el ámbito del problema propuesto en este trabajo, este concepto de vida útil es considerado adecuado, visto que la principal diferencia entre áridos convencionales y reciclados presentada en la bibliografía está relacionada a la porosidad del material (ver capítulo 3). Una posible mayor permeabilidad de la matriz del hormigón puede influir en la velocidad con que los agentes agresivos atacan la estructura.

El modelo conceptual de vida útil propuesto por Helene (1993), además, puede ser aplicado a todos los mecanismos de deterioro del hormigón. Consiste en la definición de cuatro tipos de vida útil, conforme se indica a continuación (figura 2.4):

- Vida útil de proyecto: También denominado de etapa de iniciación, consiste en el periodo de tiempo de vida del hormigón hasta que el frente de carbonatación o una concentración crítica de cloruros alcance la armadura, provocando su despasivación. Hasta este punto, no necesariamente ocurre corrosión importante en la armadura.
- Vida útil de servicio o uso: consiste en el periodo de tiempo de vida del hormigón hasta que aparezcan manchas en la superficie del hormigón, fisuras o desprendimientos en su recubrimiento. Es un periodo de tiempo variable, en función del nivel de exigencia de uso de la estructura.
- Vida útil última o total: consiste en el periodo de tiempo de vida del hormigón hasta que ocurra una reducción importante de la sección resistente de la armadura o una pérdida substancial de la adherencia armadura/hormigón, ocasionando la ruptura o colapso parcial o total de la estructura.
- Vida útil residual: consiste en el periodo de tiempo de vida del hormigón hasta que la estructura deja de desempeñar las funciones para la cual ha sido proyectada. Definida a partir de una auditoria que puede ser realizada en cualquier momento de la vida de uso de la estructura, el punto final de la vida útil residual puede coincidir con cualquiera de las vidas útiles definidas anteriores, dependiendo del nivel de exigencia de las funciones del hormigón en análisis.

De acuerdo con la figura 2.4, la vida útil de un hormigón debe ser considerada desde el momento del término de su construcción hasta el momento del término de su funcionalidad, que puede incluir tanto la etapa de iniciación del proceso de despasivación, como la etapa de propagación del mismo.



**Figura 2.4. Concepto de vida útil de estructuras de hormigón en función del fenómeno de corrosión de armadura (adaptado de Helene, 1997)**

En la actualidad existen diversos modelos de previsión de la vida útil de hormigones, básicamente relacionados al proceso de corrosión de la armadura. Mientras algunos se centran en el análisis de la etapa de iniciación o propagación, otros consideran las dos etapas en su predicción. Esta separación

es realizada, ya que la etapa de iniciación es principalmente influenciada por los fenómenos de penetración de cloruros y carbonatación, mientras que la etapa de propagación está vinculada esencialmente a los fenómenos de corrosión electroquímica.

Sean determinísticos o probabilísticos, estos modelos matemáticos permiten expresar cuantitativamente la vida útil en números de años, en función de diversos factores relacionados con la “capacidad” del hormigón de transportar agentes agresivos.

Considerando el vínculo existente entre la durabilidad y la vida útil de un hormigón, se puede, por lo tanto, utilizar la cantidad de años de vida útil previstos por un modelo como un indicador de durabilidad. Esos modelos, aplicados a los distintos mecanismos de transporte del hormigón (difusión, permeabilidad, absorción capilar y migración) generan un grupo de indicadores de durabilidad bastante amplio.

Se debe resaltar que la aplicación de modelos de previsión de vida útil en hormigones hechos con áridos reciclados permite generar un conocimiento más avanzado respecto a la durabilidad de estos nuevos materiales. Su aplicación para el análisis comparativo con hormigones convencionales, adicionalmente, posibilita cuantificar la sostenibilidad de la utilización de estos materiales reciclados, con relación a los materiales naturales.

## 2.2.2 PRINCIPALES ASPECTOS DE LA DURABILIDAD DE HORMIGONES

De acuerdo con algunos autores (Rodway, 1985, citado por Lima, 2000; Agopyan, 1986 citado por Machado, 2003, Helene, 1997), la durabilidad del hormigón está influenciada por diversos factores. Considerando todos los aspectos adoptados por cada autor, de modo general, se puede agruparlos en: proyecto (incluyendo la concepción y planificación), materiales utilizados, proceso constructivo (incluyendo la manufactura de los productos componentes y la fabricación del hormigón), la agresividad del medio al cual el hormigón está expuesto y la función y uso de la estructura. Cualquier problema que ocurra en uno de esos factores, provocará la pérdida de la durabilidad del material.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la durabilidad y vida útil de un hormigón consideran la existencia de acciones corrientes de conservación, generalmente previstas en proyecto (operaciones de auditoría, monitoreo y mantenimiento). Estas acciones están contempladas en algunas de las definiciones de vida útil presentadas en la tabla 2.4: costos esperados de mantenimiento (DURAR Network, 1997), conservación normal, que no implique operaciones de rehabilitación (EHE, 2008), mantenimiento rutinario (ACI 365.1R-00, 2000) e intervenciones previstas en el proyecto (CEB / FIP, 1990).

La agresividad del medio está condicionada a todas las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales que pueden incidir directamente en la estructura de hormigón, independientemente de las acciones mecánicas, de las variaciones térmicas de volumen, de la retracción hidráulica, entre otras relacionadas con el dimensionamiento de la estructura.

Considerando todos los demás factores que influyen en la durabilidad de hormigones como constantes, la principal cuestión relacionada al análisis de la sostenibilidad de hormigones está en los agentes agresivos y degradantes existentes en el medio.

De acuerdo con Helene (1997), los principales mecanismos de degradación del hormigón están relacionados con las acciones físicas y químicas del medio. Son ellos:

- Mecanismos relacionados con la degradación del hormigón:
  - Lixiviación: este proceso es generado por la acción de aguas puras, carbónicas y/o ácidas. En él, los compuestos hidratados de la pasta de cemento son disueltos y transportados. Como consecuencia, el hormigón pasa a presentar una superficie arenosa o con áridos expuestos, eflorescencias de carbonato, importante retención de hollín, y riesgo de desarrollo de hongos y bacterias. El proceso también puede generar una reducción del pH en los poros superficiales del hormigón, contribuyendo a la despasivación de la armadura.
  - Expansión por sulfatos: este proceso es generado por la acción de aguas o suelos que contengan sulfatos (agua del mar, aguas negras, aguas industriales y suelos con humedad y yeso). Las reacciones entre los sulfatos y la pasta de cemento hidratado generan productos expansivos y degradantes para el hormigón, produciendo fisuras, exfoliación y reducción de la dureza y resistencia superficial. El proceso también puede generar una reducción del pH en los poros superficiales del hormigón, contribuyendo a la despasivación de la armadura.
  - Expansión por las reacciones álcali-árido: este proceso es generado básicamente por la acción de las reacciones entre los álcalis del cemento y áridos reactivos, como silicas amorfas y determinados calcáreos. Compuestos reactivos como los silicatos hidratados de la pasta de cemento también pueden provocar reacciones con los álcalis. Como consecuencia, el hormigón pasa a presentar fisuras superficiales y profundas.
  - Otras reacciones: comprenden las demás reacciones, deletéreas y superficiales que ocurren en función de las transformaciones de los componentes oxidados de ciertos áridos.
- Mecanismos relacionados con la degradación de la armadura:
  - Despasivación por carbonatación: este proceso es generado por la acción del gas carbónico  $\text{CO}_2$  existente en la atmósfera. El  $\text{CO}_2$  reacciona con los hidróxidos alcalinos del hormigón, reduciendo su pH. La despasivación de la armadura solo es significativa en ambientes con humedad relativa entre 40 y 80% o en ambientes sujetos a ciclos de mojado y secado. Cuando es significativo, el proceso puede generar importante corrosión a la armadura, con la producción de manchas, fisuras, desprendimientos de trozos del hormigón e incluso, pérdida de la sección resistente y adherencia. Como punto máximo, puede causar el colapso de la estructura o de sus partes.
  - Despasivación por cloruros: este proceso es generado por la acción de aguas que contengan importante contenido de cloruros. Eventualmente, contenidos elevados de cloruros en el hormigón son originados de fuentes comunes, como aditivos, áridos contaminados por sales, agua de amasada, soluciones de sales, descongelantes, agua de

mar, atmósfera marina y procesos industriales (Helene, 1986; Andrade, 1992; Metha y Monteiro, 1994; Cascudo, 1997). Los cloruros afectan el hormigón cuando se presentan en la solución de los poros de hormigón en una determinada cantidad en relación a la concentración de hidróxidos. En esta situación, el proceso puede generar importante corrosión a la armadura, con la producción de manchas, fisuras, desprendimientos de trozos del hormigón y incluso, pérdida de la sección resistente y adherencia. Como punto máximo, puede causar el colapso de la estructura o de sus partes.

Tanto para el proceso de despasivación por carbonatación, como para el proceso de despasivación por cloruros, el fenómeno de degradación no es visualmente perceptible. En ambos casos, el fenómeno de degradación solo afecta a la armadura. El hormigón mantiene su resistencia y aspecto superficial. Por eso, la identificación del frente de carbonatación y de la concentración de cloruros deben ser realizadas por ensayos específicos.

### 2.2.3 MÉTODOS DE PREVISIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE HORMIGONES

Inicialmente, debido a la poca información de datos estadísticos sobre la durabilidad de hormigones, las previsiones de vida útil eran muy limitadas. Se basaban en la experiencia en campo de los proyectistas. Con el tiempo, sin embargo, se ha desarrollado importante conocimiento respecto a datos estadísticos de vida útil y a las variables que la afectan, mediante ensayos en laboratorios.

Actualmente, se observa una gran cantidad de modelos de previsión de vida útil disponible en la bibliografía. La gran mayoría de estos modelos está relacionada con el análisis del transporte de agentes agresivos a la armadura. Intentan prever el tiempo necesario para que el frente de carbonatación y la concentración de cloruros penetren en el recubrimiento de hormigón y alcancen la armadura, provocando su despasivación.

Todos esos modelos representan un avance significativo al estudio de la durabilidad de hormigón. Basados en modelos numéricos determinísticos y/o probabilísticos, cada modelo busca esclarecer una o más variables envueltas en el proceso de penetración de esos agentes, haciendo importantes contribuciones al tema.

No se han identificado modelos matemáticos satisfactorios para el análisis de la vida útil de hormigones, basados en los agentes agresivos al hormigón (sulfatos, lixiviación y reacciones álcali-árido, entre otros). Se observa que el análisis de la durabilidad de hormigones en este ámbito sigue en base a análisis cualitativos.

La Tabla 2.5 presenta las contribuciones de algunos autores, identificadas en la bibliografía, de modelos de previsión de vida útil de hormigones. Cada modelo toma en cuenta diferentes variables.

**Tabla 2.5. Algunos métodos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía**

Autores	Año de publicación	Tipo	Descripción
Clear y Hay	1973	Determinístico	Este modelo está relacionado con la etapa de iniciación. Se basa en medidas del potencial de corrosión realizadas por los autores y considera la relación a/c del hormigón y la concentración de los agentes agresivos en el ambiente.
Bazant	1979	Determinístico	Es un modelo matemático relacionado con la etapa de propagación, que analiza el tiempo hasta el apareamiento de fisuras en el hormigón. Considera que el transporte de oxígeno y de iones cloruro hasta el cubrimiento del hormigón es casi estacionario y unidimensional.
Tuutti	1982	Determinístico	Esta propuesta modela el transporte del agente agresivo a través del cálculo de la difusión por correlación con el coeficiente de difusión del O <sub>2</sub> (de fácil determinación en laboratorio). Su fundamento puede ser encuadrado en todos los demás modelos de deterioro. Su principio básico es bastante genérico y puede ser aplicado en otros procesos de degradación como el ataque por sulfatos, reacción álcali-árido y acciones mecánicas.
Midgley y Illston	1984	Determinístico	Este estudio presenta un modelo relacionado con la etapa de iniciación, que permite el cálculo del coeficiente de difusión de cloruros con base al análisis realizado en argamasas de cemento.
Cady y Weyers	1984	Determinístico	Este modelo ha sido desarrollado para verificar el nivel de degradación en vías. En él, la difusión de agentes agresivos es modelada por la 2ª Ley de Fick. Está relacionado con la etapa de propagación: prevé la corrosión (tiempo necesario para el apareamiento de la primera fisura) y el deterioro (tiempo límite que la estructura alcanza el área máximo para el deterioro aceptable). Este modelo parte de la premisa que la intensidad de corrosión, influenciada por la difusión de oxígeno, resistividad del hormigón y temperatura, es el punto fundamental para predecir el tiempo de corrosión.
Sentler	1984	Probabilístico	Este modelo relaciona la profundidad del frente de carbonatación con el coeficiente de difusión, la concentración de los componentes del hormigón susceptibles a la carbonatación, la diferencia parcial de presión del CO <sub>2</sub> y el tiempo. Considera la variación de valores del exponente del tiempo en función de la humedad (cuanto mayor la humedad, menor el exponente del tiempo).
Parrott	1987	Determinístico	Este modelo propone el uso de una fórmula con componentes empíricos que relaciona la profundidad de carbonatación con la permeabilidad del hormigón, la humedad relativa, el tiempo y el contenido de CaO en el hormigón.
Bakker	1988	Determinístico	En esta propuesta, el modelo relaciona el frente de evaporación con el frente de carbonatación, ignorando la existencia de carbonatación cuando el hormigón está húmedo. Calcula la profundidad de carbonatación en el tiempo a través de los coeficientes de difusión del CO <sub>2</sub> y del vapor de agua, la cantidad de compuestos alcalinos y de agua evaporada en el hormigón, la concentración del CO <sub>2</sub> en el aire y en el frente de carbonatación y la humedad en el frente de evaporación y en el aire.

**Tabla 2.5. Algunos métodos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía (continuación)**

Autores	Año de publicación	Tipo	Descripción
Andrade y col.	1989	Determinístico	Este modelo está relacionado con la etapa de propagación de la corrosión y tiene como premisa principal el uso de la ley de Faraday. Considera la intensidad de corrosión y el diámetro de la armadura.
Morinaga	1990	Determinístico	Modelo relacionado con la etapa de propagación que se basa en relaciones empíricas. Obtenido a partir de observaciones en campo y experimento de laboratorio, este modelo considera la formación de productos expansivos como responsables por el apareamiento de fisuras. Como limitaciones, este método no considera la gran variación de acciones ambientales que influyen la corrosión, ni que la forma de crecimiento de los productos de la corrosión puede ser exponencial.
Uji y col.	1990	Determinístico	Relacionado con la etapa de iniciación, este modelo considera la variación linear o proporcional a la raíz cuadrada de la concentración superficial del agente agresivo en el tiempo, conforme indica la formula de la Ley de Fick.
Papadakis y col.	1992	Determinístico	Este modelo calcula la evolución del frente de carbonatación en el tiempo a través de una expresión analítica que relaciona el coeficiente de difusión del CO <sub>2</sub> , con la concentración de CO <sub>2</sub> en el ambiente y la concentración de CH, CSH, C <sub>3</sub> S y C <sub>2</sub> S en el hormigón en el término del proceso de curado. Para el cálculo de los compuestos pasibles de carbonatación de la pasta de cemento hidratado, se propone el uso de ecuaciones basadas en las reacciones químicas de hidratación.
British Standard Institution	1992	Determinístico	En este modelo se propone que la previsión de la vida de servicio de una construcción deberá ser evaluada por: referencias a experiencias previas con construcciones iguales o similares y por interpolación de pruebas aceleradas.
Thomas y Matthews	1992	Determinístico	Este modelo propone el uso de monogramas que relacionan el periodo inicial de curado, la humedad relativa del aire, el contenido de cenizas volantes y la resistencia a la compresión para el cálculo del coeficiente de carbonatación. El cálculo de la profundidad de carbonatación en el tiempo es realizado por la multiplicación del coeficiente de difusión obtenido, con la raíz cuadrada del tiempo.
Mangat y Molloy	1994	Determinístico	Esta propuesta modela el comportamiento del coeficiente de difusión en función del tiempo. Su formulación se basa en la 2ª Ley de Fick y es una relación empírica desarrollada a partir de distintos datos de difusión de cloruros obtenidos por muestras de hormigón con distintas composiciones. El coeficiente empírico propuesto es determinado por la relación a/c del hormigón. Está relacionado con la etapa de iniciación del proceso corrosivo.
Tang y Nilsson	1994	Determinístico	La formula propuesta interrelaciona la ecuación de la 1ª ley de Fick con la ley de Freundlinch y la ley de Arrhenius para considerar la variación del coeficiente de difusión con el tiempo y del proceso de fijación de cloruros en el hormigón.
Canadian Standard Association	1995	Determinístico	En este modelo se considera las condiciones ambientales y de las instalaciones, los procedimientos de operación y el mantenimiento.

**Tabla 2.5. Algunos métodos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía (continuación)**

Autores	Año de publicación	Tipo	Descripción
Yamamoto y col.	1995	Determinístico	Relacionado con la etapa de iniciación, este modelo se basa en la 2ª Ley de Fick, pero considera tanto las características del hormigón como las condiciones de exposición de la estructura. El modelo incorpora factores de corrección. Tiene como limitación el hecho que la estimativa de los valores de los parámetros propuestos es restricta a los ensayos de laboratorio del estudio y no tienen representatividad global.
Sarja y Vesikari	1996	Determinístico / Probabilístico	Propone el uso de modelos de durabilidad determinísticos y estocásticos que consideran la degradación, el desempeño y la vida de servicio.
Bob	1996	Determinístico	Este modelo puede ser empleado tanto para el análisis de la penetración de cloruros como del frente de carbonatación. Está relacionado con la etapa de iniciación y fue realizado con base en datos de experimentos de larga duración. Considera la resistencia a compresión del hormigón, la capacidad de fijación del agente agresivo en el hormigón, la temperatura, la humedad relativa y la concentración crítica y superficial del agente agresivo en la estructura.
Mejlbro	1996	Determinístico	Este modelo presenta la resolución completa de la 2ª Ley de Fick, considerando tanto el coeficiente de difusión como la concentración superficial del agente agresivo como valores variables con el tiempo. Esta relacionado con la etapa de iniciación.
Liu	1996	Determinístico	Relacionado con la etapa de propagación, este modelo fue desarrollado con base a inúmeros resultados de ensayos de campo, en condiciones naturales por un periodo de 5 años. El modelo relaciona la temperatura, el contenido de cloruros en el interior del hormigón, la resistencia óhmica del hormigón y el tiempo de exposición con la intensidad de corrosión. Modela el tiempo hasta el apareamiento de fisuras en el hormigón
CEB (Comité Euro-International du Beton)	1997	Determinístico	Este modelo tiene como formula base el cálculo de la profundidad de carbonatación en el tiempo a través de la multiplicación de un coeficiente de carbonatación, con la raíz cuadrada del tiempo. Presenta, sin embargo, elementos adicionales relacionados al tiempo de curado. Se propone el cálculo del coeficiente de carbonatación a través del coeficiente de difusión, la concentración de CO <sub>2</sub> en el aire y el contenido de CaO en el hormigón.
Helene	1997	Determinístico	Este modelo propone el uso de ábacos para la determinación del cubrimiento de la armadura en función de la vida útil de proyecto. Considera la etapa de iniciación.
De Coss y col.	1998	Probabilístico	El modelo propuesto considera el efecto de los ciclos climáticos sobre la difusión de cloruros en hormigones porosos.
Saetta y col.	1999	Determinístico	Es un método numérico que considera la variación del coeficiente de difusión con el tiempo, los efectos de la temperatura, de la humedad relativa, del grado de hidratación del cemento y el flujo de agua en el fenómeno. Es un modelo en elementos finitos que analiza el fenómeno de difusión numéricamente.

**Tabla 2.5. Algunos métodos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía (continuación)**

Autores	Año de publicación	Tipo	Descripción
Caré y Hervé	2000	Determinístico	En el modelo propuesto, se parte de la premisa que la predicción del coeficiente de difusión de cloruros en hormigones debe ser basado en las proporciones de la mezcla.
Siemes y Vries	2002	Probabilístico	Es un modelo probabilístico refinado que considera cinco etapas de análisis para el hormigón: despasivación, fractura, desprendimiento, pérdida de adherencia y colapso.
Izquierdo	2003	Probabilístico	Este modelo se basa en la propuesta de la CEB (1997). En función de un estudio amplio de resultados de laboratorio y de campo, propone el cálculo de la profundidad de carbonatación a través de coeficientes de regresión, factores de error y de tiempo, concentración superficial del CO <sub>2</sub> en el hormigón y la edad, la relación a/c, la reserva alcalina y el tiempo de curado del hormigón. Calcula estadísticamente coeficientes de variación para los tipos de cubrimiento y las variables que intervienen en el proceso de carbonatación.
Schiessl	2005	Probabilístico	Es un modelo probabilístico que considera el coeficiente de difusión del agente agresivo en condiciones específicas de compactación, curado y ambiente, además de la concentración crítica y superficial de cloruros en mismas condiciones. Utiliza factores para considerar la edad del hormigón, la influencia del medio y las condiciones de ejecución.
Andrade	2009	Determinístico	Este modelo considera tanto la etapa de iniciación como la etapa de propagación. Parte de la premisa que el proceso de penetración de los agentes agresivos no puede ser modelado únicamente por las leyes de difusión. Debe considerar diversos fenómenos simultáneamente. Propone un modelo basado en la resistividad del hormigón.

Buena parte de los modelos encontrados se basan en la aplicación de la 1ª y de la 2ª Ley de Fick, cuyas formulas base son bastante utilizadas en las áreas de matemáticas y estadísticas. Se percibe también que, con el paso del tiempo, los modelos pasan por una evaluación, y pasan a presentar más variables de trabajo, además de permitir que sean utilizados simultáneamente sobre las estructuras.

#### 2.2.4 USO DE MÉTODOS DE PREVISIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN EL ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS

La aplicación de los modelos de previsión de vida útil existentes en la bibliografía en el análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados puede representar una gran dificultad, ya que sus formulaciones están adecuadas a las variables analizadas en cada estudio.

Para la adecuada elección o desarrollo de un modelo de previsión de vida útil, es importante identificar los datos existentes sobre el mecanismo de transporte de los hormigones en análisis y definir las variables del estudio, para, finalmente, identificar las formulaciones con mejores condiciones de aplicabilidad a la situación.

Para el periodo de iniciación del proceso de corrosión, la base científica de los **modelos determinísticos** generalmente es la Termodinámica de la Corrosión. Esos métodos se fundamentan, por lo tanto, en los principales mecanismos de transporte de gases, masa y iones en el medio poroso del hormigón:

- Permeabilidad: ecuación de D'Arcy y ecuación de Arrhenius;
- Absorción capilar: ecuación de D'Arcy modificada, de Laplace y de Arrhenius;
- Difusión de gases y iones: ecuación de Arrhenius, 1ª y 2ª ecuaciones de Fick y ecuación de Langmuir;
- Migración de iones: ecuación de Nernst-Planck, ecuación de Arrhenius, 1ª y 2ª ecuaciones de Fick y ecuación de Langmuir.

Según Helene (1997) esos cuatro principales mecanismos de transporte en el hormigón pueden, simplificadaamente, ser expresados por la siguiente ecuación:

$$x = k \cdot t^{-1/2} \quad (2.1)$$

x = Extensión recorrida por el agente agresor en centímetros

k = Coeficiente del mecanismo de transporte en análisis

t = Vida útil del hormigón, en años, en función del mecanismo en análisis.

En especial, al considerar los mecanismos de transporte del período de iniciación (absorción capilar, permeabilidad, migración y difusión), Helene (1997) defiende la idea que las predicciones de vida útil pueden ser realizadas por funciones y ecuaciones simplificadas basadas en esta formulación. El uso de constantes K correspondientes a los elementos en estudio, o sea,  $K_{O_2}$ ,  $K_{CO_2}$ ,  $K_{Cl}$ ,  $K_{H_2O}$  permitiría simplificar la clasificación de hormigones respecto a su durabilidad y contribuir para que

la toma de decisiones en la práctica sea más coherente con las necesidades de durabilidad del proyecto.

Como ejemplos de métodos determinísticos, se puede citar los modelos presentados por los siguientes autores: Tuutti (1982), Bakker (1988), Uji y col. (1990), Papadakis y col. (1992), Mangat y Molloy (1994), Tang y Nilsson (1994), Yamamoto y col. (1995), Mejlbro (1996), CEB (1997), Izquierdo (2003), y otros.

Así mismo, también están los modelos semi probabilísticos indicados en el anejo 9 de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE, 2008), que objetivan la comprobación del estado límite de durabilidad de una estructura.

Para el periodo de propagación, los modelos determinísticos están basados en la Cinética de la Corrosión. Los mecanismos y las formulas adoptados son:

- mecanismos de pérdida de masa en el acero: ecuación de Faraday
- mecanismos de difusión de iones: ecuaciones de Fick
- geometría de la pieza: ecuación de resistencia de los materiales

En lo que se refiere a **modelos probabilísticos**, se observa que los principios de dimensionamiento son similares a los clásicos principios de seguridad en proyecto de estructura de hormigón (Zagottis, 1974, citado por Helene, 1997).

Esos modelos han surgido con el objetivo de minimizar los efectos de las incertidumbres existentes en los modelos determinísticos, que, muchas veces consideran ciertas variables como constantes en el tiempo para simplificar el análisis. Por otro lado, permiten cuantificar acciones aleatorias y de difícil consideración que pueden influenciar en el resultado (variabilidad del fenómeno físico en análisis, de los demás fenómenos naturales de influencia, e incluso del propio modelo, entre otros).

Muchos de esos modelos aplican distribuciones normales o Gaussianas para las acciones agresivas y distribuciones log-normal o normal para las resistencias de la estructura a estas acciones. La tabla 2.6 presenta algunos ejemplos de distribuciones estadísticas usualmente encontradas.

En el ámbito de métodos probabilísticos, se puede citar los modelos presentados por Sentler (1984), Sarja y Vesikari (1996) e Izquierdo (2003), entre otros. El nivel de complejidad de estos modelos es variable. Pueden considerar metodologías que sugieren desde la combinación de modelos deterministas y el uso de la teoría de la probabilidad de fallo o teoría de la confiabilidad, hasta el concepto de análisis de riesgo, donde el producto de la probabilidad de fallo está relacionado al los costes generados.

La opción de combinar estos dos conceptos de métodos, el determinista y el probabilístico, es bastante interesante. Sin embargo, a veces, debido a su sencillez, su uso no considera efectivamente algunas variables importantes necesarias para la evaluación: el gradiente de concentración del agente agresivo en el ambiente, la temperatura ambiente, los eventuales ciclos de mojado y secado del hormigón, de la cantidad retenida y existente del agente agresivo en la composición de los elementos del hormigón (áridos, cemento y adiciones), ente otros.

**Tabla 2.6. Ejemplos de distribuciones estadísticas (Ang y Tang, 1975; Elsayed, 1996 citado por Andrade, 2001)**

Distribución	Formula	Parámetros	Intervalos
Normal o Gaussiana	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\mu\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu, \sigma$	$-\infty < x < +\infty$
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2}$	$\mu, \sigma$	$-\infty < x < +\infty$ $x > 0, \sigma > 0$
Gamma	$f(x) = \frac{x^{\gamma-1}}{\theta^\gamma \Gamma(\gamma)} e^{-\frac{x}{\theta}}$	$\theta, \gamma$	$x \geq 0$
Gumbel	$f(x) = -\exp[-e^{-\alpha(x-\mu)}]$	$\mu, \alpha$	$-\infty < x < +\infty$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$\lambda$	$x \geq 0$
Weibull	$f(x) = \frac{\gamma}{\theta} x^{\gamma-1} e^{-\frac{x^\gamma}{\theta}}$	$\gamma, \theta$	$x \geq 0$

Por otra parte, considerando su aplicación en un estudio comparativo de sostenibilidad, este concepto de previsión de vida útil para desarrollo de indicadores de durabilidad puede resultar bastante eficiente.

La calidad y utilidad de un indicador está fundamentalmente definida por su validez (que mida lo que pretende), confiabilidad (que los resultados medidos presenten buena repetibilidad), especificidad (que mida solo lo que se pretende), sensibilidad (que los resultados evidencien posibles cambios en el fenómeno que se mide), mensurabilidad (que utilice datos de fácil disponibilidad), relevancia (que genere resultados claros y directos) y costo-efectividad (que los resultados justifiquen el tiempo y los recursos necesarios) (United Nations, 1999).

En un estudio comparativo, la mensurabilidad y costo-efectividad de indicadores desarrollados a partir de métodos de previsión de vida útil puede ser garantizada, ya que muchas de las variables pueden ser consideradas como constantes entre las situaciones objeto de comparación.

Al mismo tiempo, el resultado final de la aplicación de esos métodos como indicadores puede fornecer información suficiente para generar análisis analíticos y prácticos que permitan la toma de decisiones. Garantizar que el método adoptado refleje adecuadamente las características del fenómeno que se pretende medir es fundamental para eso.

## 2.3 LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POR LIXIVIACIÓN COMO INDICADOR DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES

### 2.3.1 INTRODUCCIÓN

La gran cuestión ambiental acerca del uso de áridos reciclados como materias primas en la construcción civil es confirmar si su composición está limitada a elementos inertes, o si existen sustancias peligrosas (como zinc y plomo, aniones como cloruros y sulfatos, y compuestos orgánicos como hidrocarburos poli cíclicos aromáticos) en cantidad suficiente para generar algún daño ambiental (Fernandez-Sempere y col., 1997).

La utilización ambientalmente correcta de esos materiales debe basarse en referencias objetivas, y preferencialmente numéricas, de los impactos ambientales que puedan generar, sea durante su uso, tratamiento y/o vertido (Vázquez, 2002).

El análisis del proceso de lixiviación de un material de construcción hecho con árido reciclado, como, por ejemplo, el hormigón, es considerado fundamental para evaluar su sostenibilidad. Este análisis permite identificar si existe contaminación del medio y si este proceso influencia el comportamiento y la calidad del material o elemento en su papel estructural.

La lixiviación es el proceso por el cual los contaminantes orgánicos o inorgánicos de carácter soluble de un determinado material son disueltos y transportados. Cuando un material sólido entra en contacto con un líquido, algunos de sus constituyentes pueden disolverse en mayor o menor extensión. Este grado de disolución puede conducir a la lixiviación de un extracto que puede presentar elementos contaminantes eventualmente existentes en el sólido (Van der Sloot y col., 1997).

La simulación de este fenómeno en laboratorio se muestra una herramienta adecuada para conocer satisfactoriamente el mecanismo de transporte por lixiviación en materiales de construcción. Los diversos métodos disponibles permiten que el análisis de la lixiviación pueda ser realizado para todos los escenarios previstos en el ciclo de vida de un material: desde la producción, vía el período del uso, hasta su demolición y reutilización o disposición.

En un análisis global, se puede obtener datos que reflejen adecuadamente los impactos ambientales que el material de construcción pueda generar al largo de su vida útil.

Un estudio bien planeado del proceso de lixiviación permite que los resultados sean utilizados como indicadores de sostenibilidad de un material. Esos datos tiene carácter determinante en la toma de decisiones relacionada al uso de esos nuevos materiales en la producción de hormigones.

### 2.3.2 PRINCIPALES ASPECTOS DE LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN POR LIXIVIACIÓN

La lixiviación es considerada la capacidad de un material de emitir contaminantes. Su proceso consiste en la transferencia del sólido de un material a un líquido (llamado el líquido lixivante antes del contacto con el sólido, y de lixiviado después).

En una evaluación del impacto ambiental de materiales de la construcción, sea un material reciclado o no, es fundamental verificar si el proceso de lixiviación afecta las plantas, los organismos (ecosistema) o las aguas subterráneas o superficiales. La concentración elevada de un contaminante lixiviado puede representar una amenaza potencial al medioambiente de influencia del material.

En ese contexto, es imprescindible considerar el uso para el cual el material está diseñado. Debido a la naturaleza extensamente diversa de los materiales de construcción, los panoramas de uso se diferencian. Los usos pueden extenderse desde elementos granulares a monolíticos subacuáticos. Un árido de construcción, por ejemplo, puede ser utilizado de dos formas distintas:

- Como material componente de un elemento monolítico como el hormigón. En esta situación, las emisiones admisibles dependerían sí el contacto directo del elemento ocurre con agua o suelo;
- Como material granular, en la construcción de caminos. En esta situación existe más exposición directa al suelo o al agua de lluvia.

Además, el modo como el material actúa en el medio a lo largo de su vida puede variar. A lo largo de su ciclo de vida, el material se presenta:

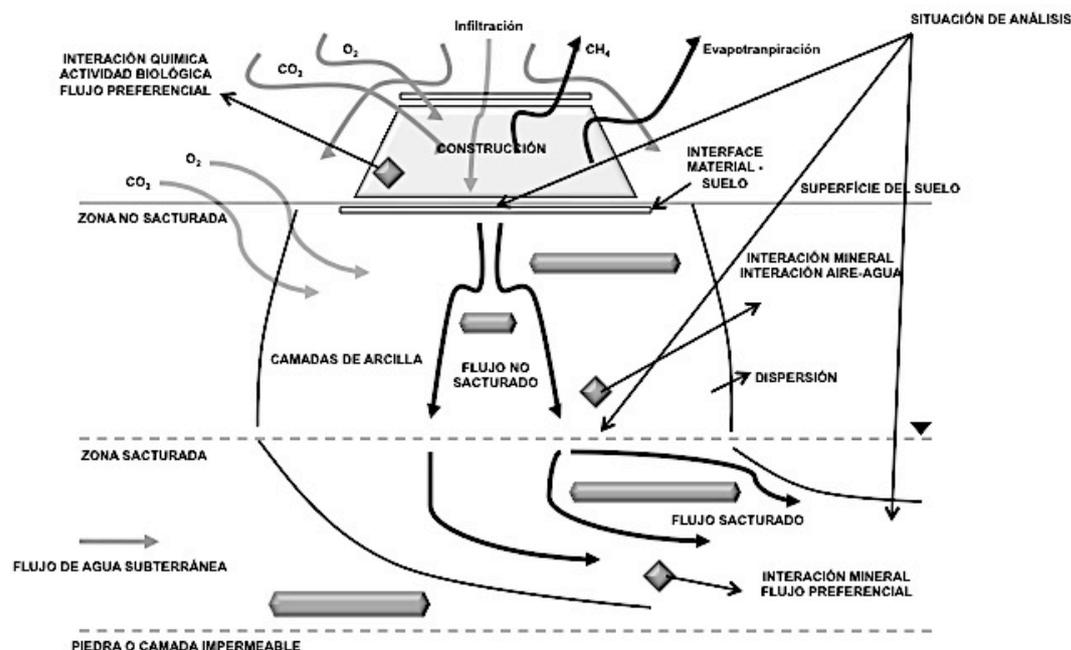
- Como material de construcción;
- Como producto manufacturado;
- Como elemento constructivo en proceso de producción;
- Como elemento constructivo de una construcción finalizada;
- Como elemento de demolición de una construcción.

Según Van der Sloot y Kosson (2003), el proceso de lixiviación es una función de:

- las características químicas y físicas del material objeto de análisis;
- la química de los componentes del material que son de interés al estudio;
- las características del ambiente en el cual el material se sitúa, incluyendo sus características químicas (pH, potencial de oxidación-reducción, presencia de componentes reactivos tales como dióxido de carbono y oxígeno, entre otros) y la naturaleza de la interacción del agua del entorno (e.g. frecuencia, cantidad, área de contacto interfacial).

La figura 2.5 presenta una representación esquemática de los factores que influyen el proceso de lixiviación de una construcción e indica cuáles son sus puntos de contaminación generales. En todo el proceso, se debe considerar las diferencias existentes entre:

- Las emisiones realizadas por la fuente (construcción), bajo influencia de los factores controlados, variables con tiempo;
- El transporte de contaminantes entre el límite de la construcción y el subsuelo o el agua subterránea, puntos del lixiviado potencialmente afectados.



**Figura 2.5. Cuadro esquemático de una construcción y su influencia en el medio por el proceso de lixiviación (adaptado de Van der Sloot y Kosson, 2003)**

También se deben considerar las siguientes condiciones del escenario:

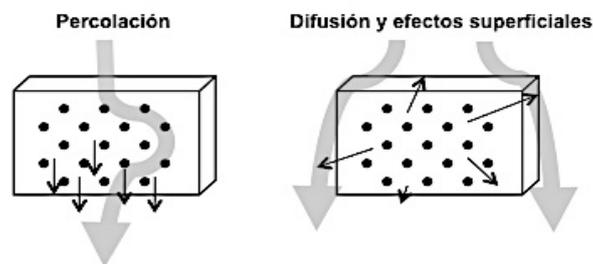
- la hidrología de la situación bajo consideración, es decir, cuánto ocurrirá infiltración y cuáles son las trayectorias de flujo relevantes / preferenciales);
- la naturaleza del material, en función de los parámetros que controlan las emisiones (pH, EC, redox y carbón orgánico disuelto);
- los cambios en las condiciones de emisión con el tiempo, debido al agotamiento de la fuente, a posibles cambios en los parámetros que controlan las emisiones (como ejemplo, los generados por la influencia de materiales adyacentes, la actividad biológica o la exclusión del oxígeno) y/o a cambios en la permeabilidad del material, debido a alguna obstrucción del poro;
- el comportamiento de los componentes lanzados en el subsuelo y en agua subterránea;
- los puntos afectados (suelo superficial, suelo subyacente y/o agua subterránea) considerando su aceptación o rechazamiento y las subsecuentes medidas atenuantes.

En ese contexto, para evaluar la lixiviación de componentes inorgánicos en los materiales de construcción a lo largo de su vida útil, es importante identificar para cada etapa de su ciclo de vida:

- La naturaleza de los elementos relevantes que componen el material: Los componentes de un material pueden tener comportamiento muy diverso, dependiendo de su composición química y de sus condiciones de uso;
- El mecanismo principal de lixiviación: son los mecanismos de transporte del líquido que determinarán la intensidad y velocidad del proceso.

En términos del comportamiento de lixiviación de materiales de construcción, dos tipos de productos deben ser distinguidos: los materiales monolíticos (hormigón, ladrillos, material de revestimiento y otros) y los granulares. Esta clasificación es importante pues determina en parte el mecanismo de transporte predominante del lixiviante/lixivado. Mientras que en materiales monolíticos la lixiviación tiende a ocurrir por difusión dominante, en los materiales granulares puede dominar la lixiviación por percolación (Vázquez, 2005):

- **Percolación:** el líquido atraviesa el material contaminado. En este caso, el contacto entre líquido y el sólido es alto, y consecuentemente, la emisión de contaminantes es maximizada. La lixiviación es determinada por **condiciones de equilibrio** entre líquido y sólido. Los sistemas de equilibrio se forman cuando la velocidad de liberación de un componente sólido es grande con relación a la velocidad del agua que percola a través del material granular.
- **Difusión:** El líquido pasa alrededor del sólido en función de su porosidad. El contacto entre los dos se reduce al mínimo. En este caso, la lixiviación es determinada por **condiciones cinéticas o dinámicas (transferencia de masa)**.



**Figura 2.6. Mecanismos de transporte de contaminantes por lixiviación predominantes en materiales (adaptado de Van der Sloot y col., 1997)**

El proceso de lixiviación de esos dos grupos de materiales se ve influenciado tanto por características físicas y químicas del material en cuestión, como los factores ambientales (Tabla 2.7).

Se debe resaltar que el mecanismo principal de transporte del lixiviante/lixivado también está vinculado a las condiciones del escenario, y no solamente a las características del material. Como ejemplo, se puede citar el caso de un residuo granular fino industrial puesto en agua estancada. A pesar de tratarse de un material granular, puede ser que el mecanismo de control de velocidad de lixiviación sea la difusión. Cada situación debe analizarse individualmente para la selección del mejor método de análisis (Vázquez, 2002).

**Tabla 2.7. Factores químicos, físicos y ambientales que afectan la lixiviación materiales de construcción (Van der Sloot y Dijkstra, 2004)**

Material	Mecanismos de transporte	Mecanismos químicos	Factores físicos	Factores químicos
Granular	Percolación Lavado superficial	Solubilidad Adsorción/Desorción	Tamaño de la partícula Permeabilidad Porosidad	pH Capacidad tampón Forma química Sales solubles
Monolítico	Difusión Lavado superficial	Solubilidad Disponibilidad	Geometría Tortuosidad Permeabilidad Porosidad	Materia orgánica Potencial Redox Fuerza iónica

La lixiviación también permite dividir los materiales, sean residuales o no, en dos categorías (Hendriks, 2000):

- Los materiales que generan emisiones dentro de los límites de lixiviación permitidos y que, en ese caso, podrán usarse de acuerdo con las exigencias de calidad normalizadas;
- Los materiales que generan emisiones superiores a los límites de lixiviación permitidos, y que podrán usarse con limitaciones. Su uso debe ser vinculado a acciones que promuevan su aislamiento del agua de lluvia y superficial y del agua freática. Se asume que el aislamiento reducirá las emisiones por lixiviación hasta los valores límite exigidos.

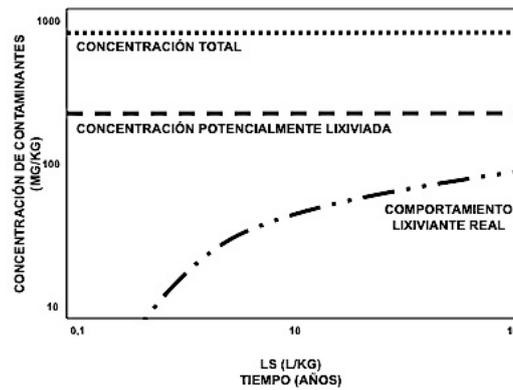
El impacto ambiental de un material no es determinado por el contenido total de un contaminante, sino por su capacidad de ser incorporada a las aguas, es decir la propagación en que es lixiviado. Como ejemplo, se puede citar que grandes cantidades de un determinado contaminante fijadas a la matriz de un material impermeable pueden ser menos impactantes si comparadas a una pequeña cantidad situada en un ambiente con gran movilidad.

Las características de los sólidos involucrados en el proceso (la relación superficie/volumen de sus partículas, los poros y su intercomunicación) son los factores que determinan el paso del sólido disuelto al líquido (Vázquez, 2002).

La concentración potencialmente lixiviable de un componente generalmente es inferior a su contenido total. Es fundamental conocer tanto el contenido total en el material del contaminante en análisis, como cuál será su fracción lixiviable en las condiciones del escenario al cual se encuentra sometido.

La cantidad disponible de un elemento para ser lixiviado, bajo condiciones extremas, es el valor de referencia para predecir las cantidades máximas que un elemento puede lixiviar a largo plazo. Por otro lado, el comportamiento real del elemento frente a la lixiviación, es determinado por las condiciones de exposición a lo largo del tiempo. Para que el parámetro de “disponibilidad” de un elemento sea utilizado de una manera adecuada, es importante que las condiciones de prueba sean acordes con la situación real (Van der Sloot y Dijkstra, 2004).

La figura 2.7 ilustra los conceptos de concentración total de un componente, su cantidad disponible o potencialmente lixiviable y la evolución real de su lixiviación con el tiempo.



**Figura 2.7. Comportamiento de la lixiviación por concentración de contaminantes (adaptado de Van der Sloot y Dijkstra, 2004).**

La diferencia existente entre la concentración total del componente y su cantidad disponible o potencialmente lixiviable debe atribuirse a la fracción que se encuentra inmovilizada por la matriz mineralógica del material. La fracción realmente lixiviable a lo largo del tiempo es indicada por la curva de evolución real y determinada por las condiciones específicas del escenario y de la aplicación en cuestión.

### 2.3.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN POR LIXIVIACIÓN

La comprensión fundamental de los procesos de lixiviación se alcanza con el estudio sobre el material, la geoquímica y la transferencia total constitutiva, en conjunto con el desarrollo y la verificación de modelos matemáticos. A través de esos datos y herramientas, se puede estimar el comportamiento de las emisiones a largo plazo y caracterizar el riesgo de contaminación, bajo las condiciones ambientales variables (Van der Sloot y col., 2005).

Los ensayos de lixiviación existentes tienen el objetivo de predecir el comportamiento a lixiviación, a largo plazo, de componentes orgánicos o inorgánicos de suelos, sedimentos o residuos tratados o no, en condiciones de campo u obra. Estos ensayos reproducen en el laboratorio los procesos que tienen lugar bajo las condiciones de exposición del campo u obra.

Las emisiones generadas por un material de construcción, reciclado o no, podrán medirse con un ensayo de lixiviación normalizado, desde que el método adoptado pueda representar adecuadamente las condiciones del material y del escenario en que él ejerce su función.

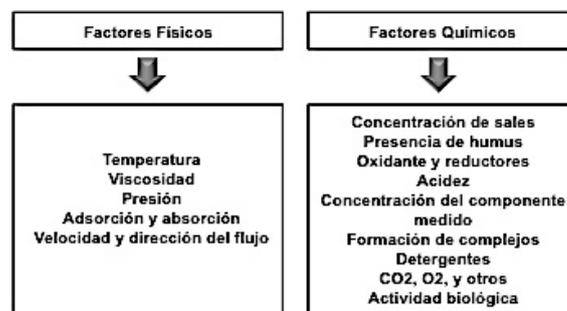
Es indiscutible la incapacidad de obtener resultados a tiempo y escala real. La ejecución de experimentos en escenarios reales es muy costosa. Los ensayos de laboratorio modelan y aceleran ciertos aspectos de la lixiviación, de modo que simulen escenarios a largo plazo.

Por otro lado, como no existe buena correlación entre los resultados en escala real y en laboratorio, los ensayos de lixiviación en laboratorio deben, siempre cuando posible, realizarse con la aplicación

de correcciones. Estas correcciones deben basarse en los factores cuantificables que pueden diferir entre la experiencia en el laboratorio y la realidad (Hendriks, 2000).

Según Vázquez (2002), la interpretación/corrección de los resultados de un ensayo de lixiviación en laboratorio al comportamiento real debe considerar los siguientes aspectos:

- el medio lixivante: varios factores físicos y químicos del medio lixivante se modifican al pasar los resultados de laboratorio a las condiciones prácticas (Figura 2.8);
- el material de construcción: varios aspectos físicos y químicos del material en análisis pueden diferir entre las condiciones de laboratorio y prácticas (tamaño, geometría y tortuosidad del material, las condiciones de equilibrio o cinéticas, la solubilidad, el pH del agua o el impuesto por las condiciones que rodean el material, las condiciones redox, los procesos de adsorción y los cambios originados por la materia orgánica, entre otros);
- la estructura de la construcción: las condiciones de la estructura en que el material en análisis ejercerá su función pueden presentar elementos adicionales que no pueden ser representados en laboratorio (existencia de capas impermeables, material aplicado en multicapas, orientación geográfica, condiciones de percolación, y otros);
- el método de ensayo en el laboratorio: las condiciones del método difieren de la situación real (elección del tipo de mecanismo de transporte, reproducibilidad, extrapolación a periodos de tiempo mayores, pre tratamiento de las muestras de laboratorio, carga por m<sup>2</sup> de suelo (considerar L/S), precisión).



**Figura 2.8. Factores que modifican el medio lixivante al pasar los resultados de laboratorio a las condiciones prácticas (adaptado de Hendriks, 2000)**

El número de factores físicos y químicos que influyen en la lixiviación es suficientemente grande como para complicar la elección del ensayo de lixiviación más adecuado para una situación. La no complementación de esos factores puede llevar a resultados incoherentes. Estos factores pueden crear situaciones diversas y variables que efectivamente contribuyen para que la elección del ensayo de lixiviación y la interpretación de los resultados sea una tarea muy compleja (Vázquez, 2002).

Actualmente se disponen de varios ensayos de lixiviación aplicables a materiales de construcción. En el ámbito europeo, en especial, se utilizan, las normas holandesas. Holanda es considerada una referencia mundial en la evaluación del impacto ambiental de sustancias lixiviadas en el suelo y agua. En el país rige un conjunto de regulaciones denominado el Decreto Holandés de Materiales de la Construcción (Building Materials Decree, 1995). En este decreto, se indica las condiciones por

las cuales los materiales de construcción pueden ser dispuestos en el suelo de forma segura y adecuada sin producir impactos deletéreos.

Se debe hacerse hincapié en el hecho que en Europa existe un gran esfuerzo por armonizar la legislación, con el objetivo de crear una postura común europea en temas medioambientales. Debido a la importancia del tema, muchas acciones están siendo desarrolladas para unificar el proceso de análisis de impacto ambiental por lixiviación. Entre ellas:

- El proyecto de armonización del Comité Europeo de Normalización CEN, creado a mitad de los noventa, con el objetivo de desarrollar nuevos ensayos europeos de lixiviación, parcialmente basados en los ya existentes, y que serán incluidos en la Directiva Europea de Productos de la Construcción (CPD 93/68/EE). En ese contexto, se debe citar que en 2005 la Comisión Europea dirigió el Mandato 366 a la CEN con la finalidad de preparar esos métodos. Como resultado de esa labor, se presenta una serie de normativas con enfoque horizontal para la evaluación ambiental de una gran variedad de materiales a partir de su caracterización.
- La Red de Armonización de Ensayos de Lixiviación / Extracción (Network on Harmonization of Leaching/Extraction Test). Creada en 1995, esta red es apoyada por el programa de Ensayos y Medidas de la DGXII de la UE (Kosson y col., 2002; Van der Sloot y col., 2003).

De acuerdo con LaGrega y col. (1994) y Van der Sloot y col. (1997), la diferencia entre los distintos ensayos de lixiviación existentes se concentran principalmente en las siguientes variables:

- Preparación de la muestra: dependiendo de la forma del material y del tipo de prueba seleccionados, la muestra puede requerir una cierta preparación en la forma de separación del líquido/sólido, de sequedad, de sub muestreo, de reducción del tamaño de la partícula, del lavado de la superficie, de compactación / remodelación, de conservación y de cura;
- Composición del líquido lixivante: el lixivante (agua, ácido, agua subterránea o las versiones simuladas de éstos) debe ser seleccionado en función del uso del material objeto del análisis. El pH del lixivante y del lixiviado es controlado a menudo y debe siempre ser medido;
- Modo y método de contacto: dependiendo de la forma de la muestra y de la prueba, las condiciones que pueden afectar la tasa de transferencia total (tales como el método de agitación, sentido y tasa de flujo, el tipo del recipiente, las consideraciones del espacio libre y el contacto con la atmósfera) deben ser debidamente considerados;
- Relación Líquido/sólido (L/S): el L/S se mide generalmente como el volumen del lixivante por la masa seca de la muestra. El cociente varía dependiendo del objetivo o del tipo de prueba, de solubilidad de los componentes del interés y de los límites de detección;
- Renovación del lixivante: algunas pruebas requieren la renovación continua o intermitente del líquido lixivante para mantener una fuerza impulsora para lixiviar;
- Tiempo de contacto: La duración de la prueba influencia la cantidad de contaminante lanzada;
- Temperatura: Las pruebas se conducen generalmente a temperatura ambiente, aunque diversas temperaturas pueden ser especificadas. Las características del material y de los mecanismos de la lixiviación son dependientes de la temperatura;

- Separación del lixiviado y del sólido: Las pruebas poseen una forma apropiada de separación tales como centrifugación o filtración;
- Análisis del lixiviado: Los parámetros de interés para el análisis de las pruebas de lixiviación deben incluir el pH, sin el cual es imposible interpretar los resultados de la prueba. Pueden también incluir virtualmente cualquier especie química. Los metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y persistentes, y los radio núcleos, son los contaminantes más comunes, pero otros parámetros, tales como los nutrientes, los componentes a granel de la matriz, los cationes y los aniones existentes y el carbón orgánico total también pueden ser de interés. También es necesario considerar el almacenaje y a la preparación de la muestra del lixiviado antes del análisis, del método de calibración y de análisis de la recuperación, y del control de calidad, aspectos esenciales para permitir la obtención de buenos resultados y la comparación de resultados entre otros métodos. El procedimiento de la lixiviación puede especificar la preparación de la muestra y los procedimientos analíticos, citando métodos o protocolos estándar.

Los ensayos de lixiviación pueden ser divididos en las siguientes categorías (tabla 2.8):

- Ensayos de disponibilidad: Evalúa la cantidad máxima disponible o potencialmente lixiviable de un componente, a través de condiciones de ensayo extremas: partículas de tamaño reducido, relaciones L/S elevadas, agitación para favorecer el contacto entre el líquido y el sólido, pH del líquido lixivante ajustado para el aumento de la lixiviación (inferior a 4 para cationes y alrededor de 7 para oxoaniones), y, en algunos casos, uso de reactivos complejantes (EDTA, citrato).
- Ensayos de caracterización básica: se utilizan para obtener datos de las propiedades características de los materiales y de su comportamiento a corto y largo plazo. En estos tipos de ensayos, se consideran los siguientes aspectos: las relaciones líquido / sólido (L/S), la composición del medio lixivante, y los factores que controlan la capacidad de lixiviación (pH, potencial redox, capacidad de generar complejos, envejecimiento de los materiales, parámetros físicos, y otros). Permiten identificar los mecanismos dominantes y determinar el rango esperado de lixiviación en escenarios específicos. Según el Comité Técnico del CEN/TC 292 (1994), se establecen tres tipos de ensayos de caracterización:
  - Ensayos de dependencia del pH: Permiten la comprensión del comportamiento químico del contaminante, evalúan su comportamiento en condiciones de exposición distintas a las impuestas por el material y comprueban la capacidad neutralizadora del material.
  - Ensayos de percolación o columna: Comprende en traspasar el líquido lixivante continuamente o intermitentemente por el material, mensurando el contaminante lixivado, bajo estas condiciones. Emplea el flujo ascendente lento del lixivante con el objetivo de permitir el logro de condiciones de estado estacionario.
  - Ensayos de difusión o monolítico: La normativa holandesa NEN 7345 (1995) es la referencia actual para este tipo de ensayo. Consiste en sumergir un material monolítico en líquido lixivante. El lixiviado se renueva y se analiza en periodos determinados. El análisis de los extractos permite identificar qué mecanismo está controlando la lixiviación: disolución, erosión o difusión. A veces simultáneamente tiene lugar una combinación de esos varios mecanismos. Comprobando la difusión, se puede predecir el comportamiento

a largo plazo de la lixiviación a partir del cálculo de coeficientes efectivos de difusión de los contaminantes en el material. Varios ensayos de difusión similares al NEN 7345:1995 se encuentran actualmente sujetos a aprobación (prEN 15863, 2008; prEN 15864, 2008).

- Ensayos de cumplimiento o conformidad: se utilizan para determinar el cumplimiento del material objeto de análisis frente a un comportamiento específico o a valores de referencia específicos. Se caracterizan por su simplicidad y rapidez. El análisis considera una serie de variables y el comportamiento frente a la lixiviación, identificados previamente en los ensayos de caracterización básica.

**Tabla 2.8. Algunos ejemplos de ensayos de lixiviación a nivel europeo**

Tipos		Material	Condición dominante	Ejemplos de referencia
Disponibilidad		Granular	-	NEN 7341:1995
Caracterización Básica	Dependencia del pH	Granular	Equilibrio	CEN/TS 14429:2005
		Granular	Equilibrio	CEN/TS 14997:2006
		Granular	Equilibrio	CEN/TS 15364:2006
		Granular	Equilibrio	NEN 7343:1995
	Percolación o columna	Granular	Equilibrio	NEN 7343:1995
		Monolítico o granular	Equilibrio	CEN/TS 14405:2004
	Difusión o monolítico	Monolítico	Transferencia de masa	NEN 7345:1995
Monolítico		Transferencia de masa	prEN 15863:2008	
Monolítico		Transferencia de masa	prEN 15864:2008	
Cumplimiento o conformidad		Granular	Equilibrio	UNE-EN 12457-1:2003
		Granular	Equilibrio	UNE-EN 12457-2:2003
		Granular	Equilibrio	UNE-EN 12457-3:2003
		Granular	Equilibrio	UNE-EN 12457-4:2003
		Monolítico	Transferencia de masa	prEN 15862:2008

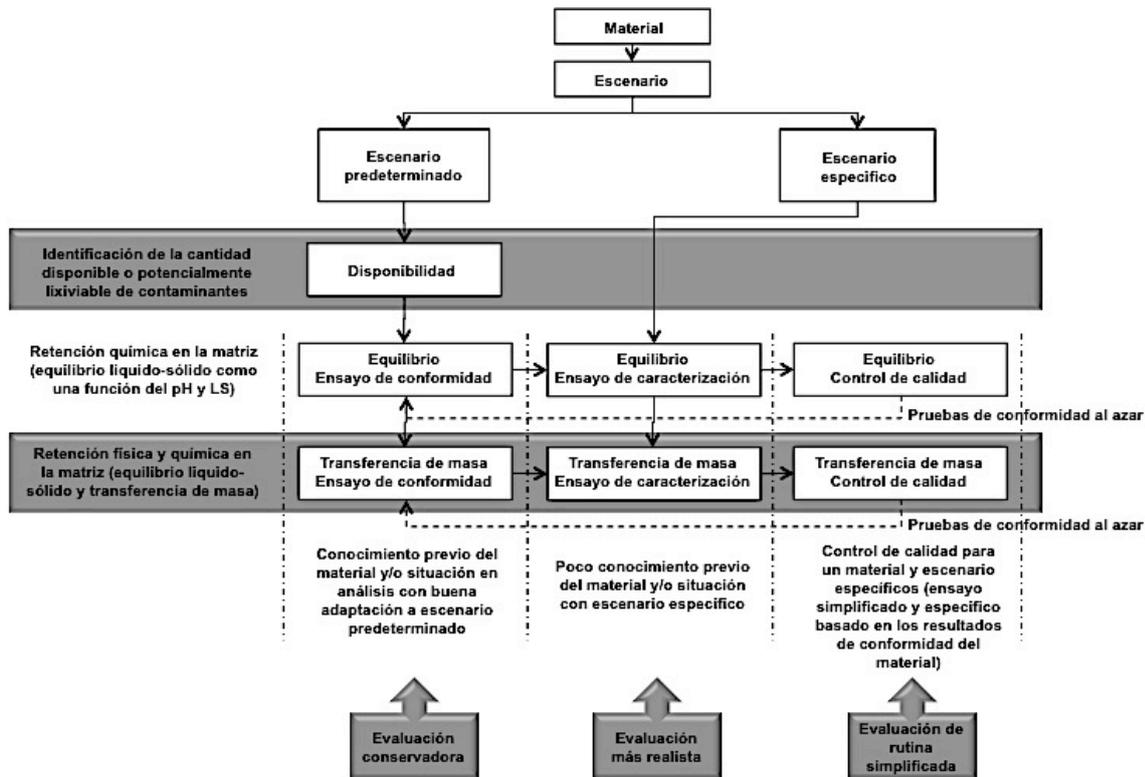
En ese contexto, la complejidad del proceso de lixiviación de un material induce al uso de métodos simplificados.

El enfoque actual parte de la premisa que la caracterización básica de un grupo o una familia de materiales de construcción cuyos mecanismos de lixiviación son limitados y similares genera una base de datos ambientales muy valorable, que contribuye a reducir la necesidad de nuevas pruebas de caracterización para materiales de ese grupo o familia (Kosson y col., 2002; Van der Sloot y col., 2006).

El análisis de un material perteneciente a un grupo o familia ya caracterizado puede limitarse a la realización de ensayos de cumplimiento. Se consideran esos ensayos suficientes para demostrar se las emisiones de un material están conformes con los valores límite establecidos en la normativa. En consecuencia, su uso simplifica el proceso de evaluación y monitorización del material o producto en análisis, generando ahorro de tiempo y trabajo.

La figura 2.9 presenta el marco de trabajo alternativo propuesto por Kosson y col. (2002) para la evaluación de la lixiviación de residuos y materiales secundarios, de acuerdo con las necesidades y características de la situación en análisis. En él, se define la necesidad del ensayo (identificar, caracterizar, confirmar o controlar el proceso) en función del conocimiento previo existente del

material, de las condiciones del escenario (nivel de adaptación de la situación en análisis a escenario pre determinados), y de las condiciones de transporte de la lixiviación en la matriz del material (equilibrio o transferencia de masa).



**Figura 2.9. Marco alternativo de trabajo para la evaluación de la lixiviación de residuos y materiales secundarios (adaptado de Kosson y col., 2002)**

Esta simplificación resulta en la limitación del número de etapas de una prueba, la reducción del número de parámetros a analizar y/o reducción de la frecuencia de ensayo (Dijkstra y col., 2005).

La jerarquía de ensayos propuesta proporciona detalles suficientes para atender las exigencias de los reguladores y creadores de las técnicas de evaluación. Asimismo, permite que el proceso de verificación y control de calidad sea técnica y económicamente viable para la práctica diaria (Van der Sloot y col., 2006).

### 2.3.4 USO DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN EN EL ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES RECICLADOS

Para el caso de hormigones hechos con áridos reciclados, es importante citar que, conforme a los criterios y procedimientos indicados por el Diario Oficial de las Comunidades Europeas del 16.01.2003 de admisión de residuos en los vertederos, los RCD se consideran inertes y sin necesidad de evaluación de su capacidad de lixiviación.

Respecto al material granular aplicado en el hormigón, la norma UNE EN 12620: 2003 indica que los áridos que sean empleados en hormigón no pueden liberar metales pesados, hidrocarburos poli aromáticos y otras sustancias peligrosas. Sin embargo, no se especifica si deberán efectuarse ensayos de lixiviación.

De acuerdo con la ACHE (2006), se identifica actualmente que los áridos reciclados de hormigón:

- No suelen tener problemas de impacto ambiental por lixiviación de metales, ya que estos elementos no suelen estar presentes en la materia prima de los reciclados;
- Pueden presentar sulfatos, procedentes generalmente del yeso, que pueden provocar el incumplimiento de los límites establecidos para estos elementos en las aguas de lixiviación;
- Pueden presentar lixiviados orgánicos, aunque es poco frecuente y suelen concentrarse más en las fracciones finas del material;
- Pueden presentar compuestos aromáticos poli cíclicos (aunque es poco probable debido a la práctica desaparición de los alquitranes en las construcciones, la presencia de esos elementos debe ser tenida en cuenta).

Van der Sloot y col. (2006) indica que, desde una perspectiva ambiental enfocada en el ciclo de reciclaje y reutilización y, en particular, en el uso como áridos no ligado, la lixiviación de contaminantes de materiales alternativos durante la vida de servicio es circunstancial.

Según Engelsen y col. (2009), resultados de dependencia del pH realizados en áridos reciclados de hormigón de distintas fracciones y edades han indicado efectos de carbonatación en los componentes Al, Ca, Fe, Mg, Si y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Para este estudio, se ha aplicado un modelo geoquímico basado en condiciones de equilibrio y datos termodinámicos para predecir la solubilidad de control de la fase mineral de estos materiales en función del pH. Estas predicciones han permitido identificar la importancia de los carboaluminatos, la etringita y la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio en la lixiviación de estos materiales:

- Las fases de cemento hidratado (hidrato de silicato de calcio, aluminato de calcio hidratado y hidrogranate) son predominantes en el pH del material.
- La concentración de carboaluminatos se presenta fuertemente dependiente de los carbonatos disponibles en las muestras.
- Con el descenso del pH, o las fases se descomponen a más especies solubles, o precipitados, como los hidróxidos de hierro y aluminio, wairakita y sílice amorfa, se forman.
- En ambientes más ácidos, la mayoría de las fases se disuelve y los principales elementos se acercan a la concentración máxima.

El contenido variable de mortero adherido presentado por las muestras ha influenciado en su contenido lixiviable. Esas variaciones han influenciado directamente en la capacidad de neutralización de los ácidos.

Por otra parte, Sani y col. (2005) han investigado las características estructurales de hormigones reciclados a través de un ensayo de lixiviación dinámico. El objetivo ha sido analizar el lanzamiento de álcalis del material, puesto que el flujo intersticial de los poros en contacto con los materiales de

cemento hidratados es caracterizado por valores de pH alcalinos persistentes (silicato del calcio hidratado, portlandita y de iones alcalinos). En ese estudio se identifica que el uso de árido reciclado en la producción de hormigones modifica tanto la estructura del material como su capacidad de lixiviación:

- la lixiviación de iones no reactivos (Na, K, Cl) aumenta en hormigones reciclados;
- la lixiviación del Ca disminuye a pesar de la mayor porosidad de la microestructura identificada en las muestras en análisis. Este comportamiento es atribuido a un nivel más bajo de portlandita, responsable del calcio soluble;
- la tasa de lixiviación de iones (expresada para la unidad del área superficial específica) es más baja y directamente relacionada con el porcentaje de poros macros y mesos de los hormigones reciclados;
- los resultados de Ca, Na y K indican la existencia de diferentes procesos de lixiviación, pero también sugieren que el proceso de difusión es el mecanismo más relevante en hormigones.

Debido a sus características heterogéneas, no hay dudas que pruebas de lixiviación son necesarias para confirmar la seguridad ambiental del uso de áridos reciclados en hormigón, sean áridos de hormigón o mixtos.

Durante el ciclo de vida de un hormigón, reciclado o no, el árido se presenta de distintos modos. Desde el material en su forma granular, en las etapas de provisión de materias prima y demolición, hasta el material como un componente de un elemento monolítico (hormigón), en las etapas de uso.

No todos los aspectos relevantes del proceso de lixiviación de un material a lo largo de su vida útil pueden ser evaluados por el uso de una única técnica. La realización de un conjunto de ensayos muchas veces es requerida para obtener toda la información necesaria para verificar el uso seguro de un material en todas las etapas de su ciclo de vida.

Las diferencias de condiciones de exposición del material conducen a diversas tasas y grados de emisiones. El análisis de impacto ambiental por lixiviación de un hormigón reciclado debe, por lo tanto, considerar ensayos y análisis diferenciados, en función del uso y periodo de vida objeto de análisis.

Los ensayos de laboratorio existentes consideran diversos aspectos ambientales del elemento constructivo y su medio. Adicionalmente, estos métodos han demostrado su potencial conveniencia para determinar el impacto ambiental de las diversas etapas del ciclo vital de los materiales.

Se escogen los tipos de ensayos a realizar para cada etapa del ciclo de vida de un hormigón reciclado en función de las condiciones en que el árido reciclado ejerce su papel:

- Etapa 1 (Provisión de materias primas): para esta etapa se considera suficiente la realización de un ensayo de cumplimiento. Se parte de la premisa que ya existe un conocimiento del grupo o familia de ese material y que él ya se encuentra debidamente tratado por una planta de reciclaje. Ejemplo de uso: Serie UNE-EN 12457:2003 (UNE-EN 12457-1, 2003; UNE-EN 12457-2, 2003; UNE-EN 12457-3, 2003; UNE-EN 12457-4, 2003).

- Etapa 2 (Manufactura de los productos): Las evaluaciones para esta etapa ya deben considerar el material como un componente del hormigón. El sistema poroso en análisis es un elemento monolítico. La difusión de los constituyentes dentro del material es el mecanismo de transporte que determina la velocidad de la lixiviación. En el hormigón, reciclado o no, el agua penetra por succión capilar. El transporte de agua tiene lugar por conducción capilar y el movimiento de los componentes del sólido disueltos por difusión. Actualmente, el ensayo de difusión NEN 7345 es considerado el adecuado para estudiar la lixiviación en el hormigón en condiciones reales de uso.
- Etapa 3 (Construcción) y Etapa 4 (Uso y mantenimiento): para estas etapas se propone la realización de un ensayo de cumplimiento, ya que existe un conocimiento previo del material, obtenido en la etapa anterior. Ejemplo: prEN 15862:2008.
- Etapa 5 (Demolición): Las evaluaciones para esta etapa deben considerar el material en estado granular:
  - Para la situación de uso de este residuo como material granular en la construcción de vías, el proceso de lixiviación predominante es la percolación. Un ensayo en columna es considerado el más realista para estudiar la lixiviación en estas condiciones. Ejemplo: CEN/TS 14405:2004.
  - Para la situación de disposición directa de este material, el proceso a ser representado es la penetración del agua de lluvia en un depósito del residuo granular. En este caso, las condiciones de la exposición pueden ser extremas, y una prueba de dependencia del pH es el método más conveniente para determinar la lixiviación a largo plazo. Ejemplo: CEN/TS 14429:2005, CEN/TS 14997:2006, CEN/TS 15364:2006.

La figura 2.10 presenta las etapas del ciclo de vida de un hormigón, indicando la situación de los ensayos de lixiviación necesarios para caracterizar el material frente a su impacto en el medio a lo largo de su vida. La realización de este conjunto de ensayos a lo largo del ciclo de vida de un hormigón permite obtener todos los datos cualitativos necesarios para confirmar el uso seguro de este material.

Se observa que la evaluación del impacto ambiental por el conjunto de ensayos de lixiviación sugerido considera todas las etapas de vida del material. Evalúa las materias primas antes del proceso de producción (Etapa 1), evalúa y controla la calidad de los productos manufacturados (Etapas 2 y 3), verificando si el material no generará contaminación a lo largo de la Etapa 4, y evalúa los materiales reciclados (Etapa 5), definiendo si el material sigue apto para uso en la construcción civil o ha llegado al final de su vida útil.

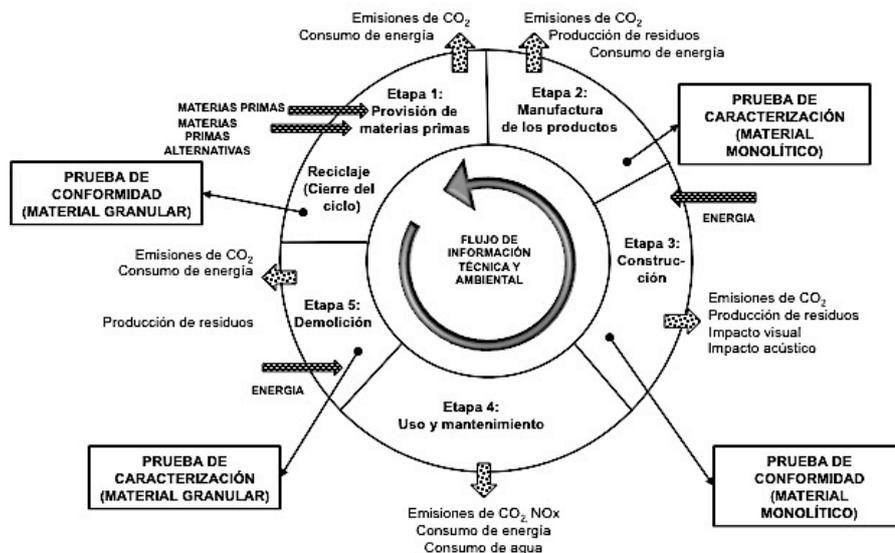


Figura 2.10. Ciclo de vida de un hormigón reciclado con las pruebas de lixiviación alocadas (adaptado de Van der Sloot y col., 2006)

## 2.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Una de las formas más positivas para contribuir al aumento de la sostenibilidad de un hormigón está en el periodo inicial de la actividad, a través de la decisión por uso de materiales más sostenibles, como los áridos provenientes del reciclaje de residuos de construcción y demolición.

Sin embargo, existe una indiscutible carencia de metodologías específicas de evaluación ambiental, que comprueben la sostenibilidad de los hormigones hechos con esos materiales reciclados. Las implicaciones ambientales a largo plazo del uso de áridos reciclados en hormigón siguen siendo dudosas, principalmente en lo que se refiere a los ciclos de uso, reciclaje, reutilización en otros usos y destino final.

Existen en la actualidad diversos métodos científicos que permiten apoyar la gestión medioambiental de productos, procesos y servicios. Entre ellos, el análisis del ciclo de vida es considerado como la herramienta más completa y efectiva disponible, visto que posibilita valorar y evaluar todos los impactos ambientales potenciales ocurridos en el ciclo de vida total del producto en análisis (Hendriks, 2000).

El análisis del ciclo de vida de un material de construcción es un proceso de gran complejidad, que debe considerar inúmeras variables de tiempo, espacio y estructura del sector de la construcción civil.

Desde un enfoque ambiental, estudios específicos pueden concentrarse en determinadas fases del ciclo de vida de un producto o estar relacionados solo con el ciclo de vida de algunos materiales o servicios utilizados en su construcción, con el objetivo de simplificar y direccionar el análisis.

En algunos casos, se recomienda que la metodología de análisis sea hecha inicialmente en fases o componentes de su ciclo de vida, debido a la necesidad actual de avanzar en el conocimiento específico respecto a estos materiales. Solo después del dominio de estos aspectos, se debe actuar sobre el ciclo de vida completo (Trinius, 1999).

El análisis de la sostenibilidad de hormigones con áridos reciclados se encaja exactamente en este concepto, visto que el índice de sostenibilidad de materiales de construcción es un índice que tiene carácter comparativo.

De modo general, el cálculo del índice de sostenibilidad de un hormigón reciclado es obtenido por la suma de todos los consumos e impactos ocurridos a largo de todo su ciclo de vida, dividida por el tiempo de vida útil del producto. Considerando los distintos aspectos objeto de análisis, puede abarcar diferentes índices parciales de sostenibilidad, que deberán ser sumados con la ayuda de coeficientes de ponderación necesarios.

Por otro lado, en general, al cuantificar la sostenibilidad de hormigones, el balance de consumos e impacto ambiental a corto plazo, es muy inferior al mismo balance realizado a largo plazo:

- A corto plazo, el balance está relacionado con los consumos e impactos de las etapas de obtención de las materias primas, producción del hormigón y ejecución de la construcción;
- A largo plazo, el balance está relacionado con los consumos e impactos de las etapas de uso y mantenimiento de la construcción y de las etapas de demolición y/o reciclaje.

El análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados puede, por lo tanto, ser realizado a través de un estudio comparativo con hormigones convencionales, centrándose exactamente en los aspectos más importantes del perfil medio ambiental de este producto:

- **Durabilidad y vida útil:** Verificar si un hormigón reciclado es tan o más durable que un hormigón convencional, es el punto clave para determinar la sostenibilidad de este material. Según Burón Maestro (2007), en el caso de hormigones, debido a su vida útil elevada, la reducción de consumos e impacto ambiental a corto plazo es, cuantitativamente, menos importante, que la reducción producida, en los mismos conceptos, a largo plazo. La sostenibilidad de un hormigón está más relacionada con su comportamiento en servicio que por sus materias primas y su proceso constructivo. El análisis de la durabilidad y vida útil de un hormigón permite generar un grupo de indicadores cuantitativos de extrema relevancia para medir la sostenibilidad de un hormigón.
- **Impacto ambiental por lixiviación:** Verificar que el valor de emisiones generadas por un hormigón reciclado a lo largo de su vida útil no produce impacto ambiental al medio es determinante para confirmar su viabilidad ambiental de uso. Este valor puede ser mensurado para todo su periodo de vida útil. A través de ensayos de laboratorio o a través del análisis de su estructura en campo, este análisis proporciona una evaluación precisa del potencial de contaminación ambiental de esos nuevos materiales aplicados a hormigón. El análisis del impacto ambiental por lixiviación de un hormigón permite generar un indicador de carácter cualitativo de extrema relevancia para comprobar la sostenibilidad de hormigones reciclados.

En lo que se refiere a la durabilidad y vida útil como indicadores de la sostenibilidad de hormigones reciclados, se observa que:

- El punto clave está relacionado a la capacidad del hormigón de comportarse adecuadamente frente a acciones agresivas y degradantes que se presenten en el medio en que están expuestos. Los principales mecanismos de degradación del hormigón están relacionados con la degradación del hormigón (lixiviación, expansión por sulfatos y por reacciones álcali-árido) y con la degradación de la armadura (despasivación por carbonatación y por cloruros).
- Modelos de previsión de la vida útil de hormigones pueden ser herramientas eficaces en el proceso de cuantificación de la durabilidad de hormigones. Relacionados al proceso de corrosión de la armadura, estos modelos posibilitan expresar la vida útil de un hormigón en números de años, en función de diversos factores vinculados a la “capacidad” del hormigón de transportar agentes agresivos. Los modelos pueden ser aplicados a los distintos mecanismos de transporte del hormigón (difusión, permeabilidad, absorción capilar y migración), generando un grupo de indicadores de durabilidad bastante amplio.
- La aplicación de esos modelos puede ser una tarea difícil, ya que muchos de ellos han sido desarrollados para estudios específicos y/o no consideran todas las variables de influencia necesarias. En un análisis comparativo, sin embargo, estas herramientas pueden resultar eficientes, ya que muchas variables pueden ser consideradas como constantes entre las situaciones objeto de comparación. La elección adecuada de un modelo debe considerar los datos existentes sobre el mecanismo de transporte en análisis y las variables del estudio.

Respecto a la evaluación del impacto ambiental por lixiviación como indicador de la sostenibilidad de hormigones, se observa que:

- Es una herramienta de extrema importancia pues es necesaria para una comprensión ambiental apropiada del material. La realización de ensayos de lixiviación permite obtener los datos cualitativos necesarios para confirmar el uso seguro de este material.
- Una larga variedad de procedimientos de simulación de la lixiviación se han desarrollado en los últimos tiempos. Aunque la gran mayoría de normas de lixiviación existentes no fue desarrollada inicialmente para materiales de construcción, varias herramientas están disponibles y han demostrado su conveniencia potencial para determinar diversas etapas del ciclo vital de los materiales.
- Diversas pruebas de lixiviación existentes en la actualidad pueden ser aplicadas en la evaluación de las características ambientales de un hormigón, permitiendo que el análisis considere las diversas etapas del ciclo de vida del producto. La elección de los tipos de ensayos necesarios debe considerar la función de los materiales en análisis en cada una de las etapas del ciclo de vida del producto.

La realización de estudios específicos para cuantificar la sostenibilidad de hormigones hechos con áridos reciclados, por lo tanto, proporciona:

- Análisis amplios que consideran diversas etapas del ciclo de vida del hormigón y forman una base para la comprensión y cuantificación del comportamiento ambiental de los áridos reciclados, considerando un conjunto de parámetros importantes en la escala de tiempo.

- Modelos de herramientas para uso en el control de calidad de los áridos reciclados, centrados en los parámetros dominantes de la sostenibilidad del hormigón y coherente con el comportamiento característico del material reciclado.

Estudios en este contexto tienen gran relevancia pues permiten mejorar la calidad de los argumentos científicos existentes en la actualidad sobre áridos reciclados, generando mayor conocimiento disponible para los generadores, gestores e investigadores, sobre la viabilidad ambiental de uso de áridos reciclados en hormigón.



## CAPÍTULO 3

# ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD PARA USO EN HORMIGONES

### 3.1 LA IMPORTANCIA DEL USO DE ÁRIDOS RECICLADOS EN LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES

El proceso de selección de los materiales es una de las fases de la construcción en que más sencillo resulta incidir, económica y técnicamente, en la reducción del impacto medioambiental. Es preferible utilizar materiales procedentes de recursos renovables, y dar prioridad a aquéllos cuyos procesos de extracción sean más respetuosos con el entorno.

El uso de materiales reciclados es una alternativa que presenta atractivos e importantes beneficios para el ciclo de vida de una construcción, pues promueve, en general:

- reducción del volumen de extracción de materias-primas por parte de la industria de la Construcción Civil, preservando, así, los recursos naturales limitados,
- reducción del consumo de energía, por el ahorro de las grandes cantidades de energía ya incorporadas a estos sub-productos, y por la reducción de las distancias de transporte de materias-primas, suponiendo, a su vez, la reducción de los impactos por el ahorro de recursos no renovables (petróleo, carbón, etc.) o por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>,
- reducción de la contaminación generada,
- reducción de la disposición inadecuada de los residuos generados.

La Tabla 3.1 presenta la reducción en porcentaje del impacto ambiental generado por la producción de algunos materiales de construcción civil cuando se considera la utilización de productos reciclados.

Teniendo en cuenta específicamente las materias primas utilizadas para la producción del hormigón, varias acciones pueden ser realizadas para aumentar la sostenibilidad del producto y reducir significativamente el balance de consumos e impacto ambiental en la etapa de producción. Entre ellas, se destaca el uso de áridos reciclados de RCD.

**Tabla 3.1. Reducción del Impacto Ambiental (en %) del Reciclaje de Residuos en la Producción de Algunos Materiales de Construcción Civil (Udaeta y Kanayama, 1997, citado por John, 2001)**

Impacto Ambiental	Materiales producidos		
	Acero	Vidrio	Cemento <sup>1</sup>
Consumo de energía	74	6	40
Consumo de materia prima	90	54	50
Consumo de agua	40	50	-
Contaminantes atmosféricos	86	22	<50 <sup>2</sup>
Polución acuática	76		-
Residuos en general	105	54	-
Residuos minerales	97	79	-

<sup>1</sup> Sustitución por 50 % de escoria de alto horno

<sup>2</sup> Producción del CO<sub>2</sub>

Estudios hechos en Bélgica y Holanda (Janssen, 2007) aplicaran un modelo computacional de logística que permite identificar las cantidades de ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> pasibles de obtención por la aplicación de áridos reciclados en sustitución de materiales convencionales. Los resultados identificados en los dos casos indican que es posible obtener hasta un ahorro de cerca de 75% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, al comparar la situación en que se utiliza apenas materias primas convencionales con la que se realiza reciclaje “in situ” (Tabla 3.2).

Sobre todo, Janssen (2007) indica que la optimización del ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de áridos reciclados depende de los siguientes aspectos:

- La relación entre la cantidad de material a ser demolido y la cantidad de material necesario para la nueva construcción (cuanto más grande, mejor);
- La posibilidad de fabricar el árido reciclado “in situ” (si es viable, mejor);
- La aplicación de producto reciclado “in situ” (cuanto más, mejor);
- La posibilidad de producir hormigón con árido reciclado (si es viable, mejor).

**Tabla 3.2. Índice de rentabilidad de CO<sub>2</sub>**

Comparación de situaciones	Ahorro de Co <sub>2</sub> (%)	
	NATO Headquarters - Bruselas	Róterdam Harbour - Róterdam
Situación 1 x Situación 0	14,46	45,32
Situación 2 x Situación 1	16,91	54,82
Situación 2 x Situación 0	28,93	75,30

Nota: Situación 0: No hay reciclaje. Uso exclusivo de materias primas naturales

Situación 1: Reciclaje “off site” y uso máximo posible de materiales reciclados

Situación 2: Reciclaje “on site” y uso total de materiales reciclados en el emprendimiento.

En el ámbito de España, Estévez y col. (2003), han realizado un inventario del ciclo de vida del reciclaje de RCD en plantas móviles, con el objetivo de evaluar el impacto ambiental generado por los procesos involucrados en esta práctica. Emisiones con gran influencia en el efecto invernadero, acidificación y eutrofización ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_x$  y polvo) han sido analizadas y comparadas con las producidas por los procesos de extracción de recursos naturales.

Como resultado de este estudio, se ha identificado que los procesos de reciclaje de residuos generan menor impacto ambiental que la extracción de áridos naturales: la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitida durante el reciclaje de RCD equivale a menos de la mitad que la emitida por extracción de árido natural (3.000 g por tonelada de árido reciclado en comparación a 6.900 a 7.700 g por tonelada de grava y arena). La diferencia entre cargas ambientales generadas por ambos procesos se debe al consumo de energía implícito en el proceso de extracción, no existente en el proceso de reciclaje, y, principalmente, a la energía de transporte (las distancias consideradas en los inventarios de los procesos de producción de áridos naturales son mayores que las consideradas en los procesos de reciclaje realizados por plantas móviles).

Por otra parte, se debe resaltar que originalmente en la historia del reciclaje de residuos de construcción y demolición, los áridos reciclados eran utilizados en aplicaciones técnicamente sencillas como el relleno de terraplenes, los sistemas de protección de ruido y en bases y sub-bases de carreteras. Esta situación todavía se mantiene en la actualidad.

Estas soluciones clásicas, sin embargo, indican un descenso en el ciclo productivo del material original. Además, naturalmente la demanda de construcción de carreteras tiende a disminuir con el tiempo, mientras que la construcción de nuevos edificios y demás estructuras seguirá estable y la necesidad de renovación o demolición de edificios y estructuras antiguos aumentará.

Se percibe la importancia de consolidar la aplicación del árido reciclado en usos más nobles, como es el caso del hormigón estructural. El uso de áridos reciclados en hormigón promueve un cierre ideal del ciclo de producción del árido reciclado y posibilita su uso en el mismo nivel que el material original.

La forma de producción de los áridos reciclados tiene gran relevancia en ese contexto. Los condicionantes técnicos de la etapa productiva de áridos reciclados son fundamentales para definir su viabilidad y su potencial de reciclaje. Dependiendo de los tipos de trituración empleados, métodos de clasificación y eliminación de contaminantes disponibles es posible obtener áridos de distintas calidades, viabilizando o no su uso en aplicaciones técnicamente más exigentes, como el hormigón.

## 3.2 LEGISLACIÓN Y NORMATIVAS VIGENTES EN ESPAÑA

Respecto a la gestión de RCD, en España, el Ministerio de Medio Ambiente publicó en el año 2001 un Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD, 2001).

El objetivo fundamental del PNRCDD envuelve la recogida controlada, la correcta gestión ambiental, el reciclaje y la reutilización de los residuos de construcción y demolición. El período previsto de aplicación era de cinco años. En él, se ha estimado que en el año 2006 debía producirse una disminución aproximada del 10% en la generación de RCDs y un nivel de reciclado del 25% (Fundación Conama, 2004).

El PNRCDD ha sido renovado en febrero de 2008 con el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCDD). El objeto del II PNRCDD, actualmente en su versión preliminar, es establecer los objetivos de prevención, reutilización, reciclado, otras formas de valorización y eliminación de los RCD en España, las medidas para conseguir dichos objetivos, los medios de financiación y el procedimiento de revisión. La redacción del II PNRCDD parte de la experiencia adquirida en el desarrollo y aplicación del PNRCDD 2001-2006. El nuevo plan forma parte del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el período 2008-2015. Toma como base principal los planes de las Comunidades Autónomas y de las Entidades locales relativos a RCD, así como el resultado del “Estudio sobre la generación y gestión de los residuos de construcción y demolición en España” (PNIR 2008-2015, 2008).

Asimismo, también se ha aprobado el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

En el ámbito de Cataluña, es importante destacar que ya hay una estructura de gestión y tratamiento de residuos de construcción desde 1994. Se ha aprobado un decreto regulador de los escombros y otros residuos de construcción y la creación de la empresa Gestora de Runas de la Construcción, seguida de la creación de la Gestora Metropolitana de Runas (GMR). En ambas es copartícipe la Agencia de Residuos de Cataluña. Por último, está el Programa de Residuos de la Construcción en Cataluña, 2007-2012 (PROGROC, 2007). Este programa objetiva garantizar las operaciones de separación de residuos en las instalaciones autorizadas para recibir RCD, así como fomentar al máximo la separación en origen mediante la implantación de sistemas de escalamiento de precios por densidad y calidad de los RCD encaminados a las instalaciones de deposición de rechazo.

Respecto al uso de los áridos reciclados, la normativa española que proporciona el marco general para su uso está formada por la “Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción” y las Normas Armonizadas siguientes:

- Norma UNE-EN 12620:2003, “Áridos para hormigón”;
- Norma UNE-EN 13043:2002, “Áridos para mezclas bituminosas y tratamiento superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas”;
- Norma UNE-EN 13055-1:2002, “Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigones, morteros y lechadas”;
- Norma UNE-EN 13139:2002, “Áridos para morteros”;
- Norma UNE-EN 13242:2002, “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes de carreteras”;
- Norma UNE-EN 13383-1:2003, “Escolleras. Parte 1: especificaciones”;
- Norma UNE-EN 13450:2002, “Áridos para balasto”.

Esta Directiva indica que “los productos de la construcción, que, como en el caso de los áridos, se incorporen con carácter permanente a las obras, se deben adaptar, en todos los países de la UE, mediante una adecuada armonización de su normalización, a los requisitos esenciales de seguridad, salud y a otros requisitos que deberán ser exigidos para garantizar la calidad de los mismos.” (Fundación Conama, 2004).

En el ámbito de España, tal directiva se efectúa a través del Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre de 1992, que predice que los productos de construcción que cumplan las prescripciones del Real Decreto, llevando, en consecuencia el marcado CE, podrán importarse, comercializarse y utilizarse en todo el territorio español (Fundación Conama, 2004).

En ese contexto, el Comité Técnico CEN/TC-154 "Aggregates", del Comité Europeo de Normalización (CEN), ha sido el responsable por la propuesta de unificación de las especificaciones técnicas para los áridos reciclados, para el marcado CE.

En concreto a respecto del hormigón estructural, se cita la Comisión Permanente del Hormigón, órgano administrativo del Estado encargado de la redacción de normativa técnica sobre hormigón estructural, que constituyó el Grupo de Trabajo 2/5 “Hormigón Reciclado”. Este grupo fue formado en noviembre de 2002 con el propósito de elaborar unas recomendaciones de utilización de áridos reciclados de hormigón en el campo del hormigón estructural. La documentación resultante complementa la reglamentación actual del hormigón estructural (anejos 15 y 18 de la Instrucción EHE).

Basadas en los mismos métodos establecidos para hormigones convencionales, estas recomendaciones restringen el uso de áridos de hormigón a los siguientes casos:

- Sólo se debe utilizar áridos reciclados para producción de hormigón en masa y armado, excluyendo su uso en hormigón pretensado;
- Sólo se deben utilizar áridos procedentes del reciclado de hormigón convencional, con calidad del hormigón de origen comprobada (originados de hormigones estructurales sanos, o bien de hormigones de resistencia elevada). El objetivo es garantizar la obtención final de un árido de propiedades adecuadas y con una uniformidad suficiente. Se excluye el uso de áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.), y los procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afecten a la calidad del hormigón (tales como álcali árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.) o los procedentes de hormigones especiales tales como hormigones ligeros, hormigones con fibras o aquellos que se fabrican con cemento aluminoso,
- Utilizar sólo la fracción gruesa del árido reciclado (tamaño mínimo superior a 4 mm). El uso de las fracciones finas puede generar, entre otros problemas, un aumento importante de la retracción por secado y de la fluencia debido a la mayor cantidad de agua que necesitan en su dosificación;
- Se permite sustituir hasta un 20% en peso del árido natural en hormigones armados. Con esta limitación, las propiedades finales del hormigón reciclado apenas se ven afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional. Para porcentajes superiores, es necesaria la

realización de estudios específicos y experimentación complementaria referente a cada aplicación deseada. Para hormigones en masa, la instrucción permite sustituir hasta un 100% en peso del árido natural.

- En el caso de hormigones para uso en ambientes agresivos, el empleo del árido reciclado estará condicionado por procedimientos especiales como, por ejemplo, utilizar una única fuente de árido reciclado controlada, realizar ensayos complementarios, incrementar el contenido de cemento o disminuir la relación agua/cemento en la dosificación, etc.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Las normas europeas armonizadas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) definen los áridos reciclados como los áridos originados del tratamiento de material inorgánico, natural, artificial o reciclado, previamente utilizado en la construcción.

Por lo tanto, pueden ser definidos como los áridos provenientes del machaqueo de los materiales pétreos residuales de los procesos de:

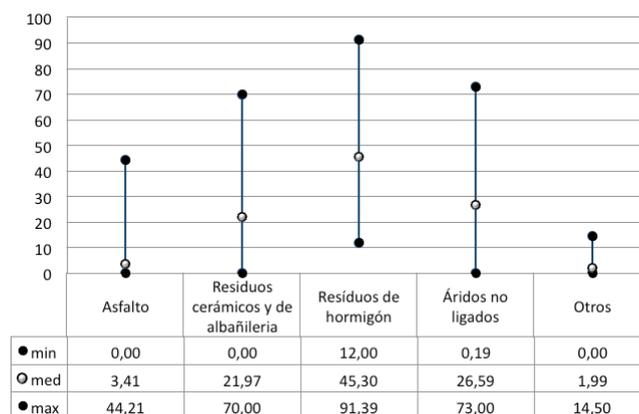
- construcción, demolición, reformas y reparaciones de pavimentación y de otras obras de infraestructura, inclusive suelos provenientes de terraplenes;
- construcción, demolición, reformas y reparaciones de edificaciones: componentes cerámicos (ladrillos, bloques, tejas, placas de revestimiento, etc.), mortero y hormigón;
- fabricación y/o demolición de piezas prefabricadas en hormigón (bloques, tubos, ladrillos, etc.) producidas en las obras.

En lo que se refiere a su composición, los áridos pueden estar constituidos por residuos de hormigón y mortero, elementos cerámicos, áridos no ligados, elementos asfálticos y otros materiales.

De acuerdo con el diagnóstico de plantas de reciclaje españolas realizado por el Proyecto GEAR (2010), cerca de 95% del material que compone el árido reciclado producido por las 67 plantas analizadas por el proyecto es compuesto mayoritariamente por elementos cerámicos, de hormigón y mortero y árido natural no ligado (figura 3.1):

- La presencia de elementos cerámicos varía entre 20 y 70%;
- La presencia de elementos de hormigón, mortero y árido natural varía entre 12% y 91%.

Sobre todo, solo 15,31% de las muestras analizadas por el proyecto han presentado una composición única, donde los elementos pétreos y de hormigón y mortero tienen un valor igual o superior al 95% del peso total.



**Figura 3.1. Cantidad media, máxima y mínima (%) de los elementos que componen los áridos reciclados producidos en España (Proyecto GEAR, 2010)**

En la actualidad, muchas normas europeas proponen una clasificación de los áridos reciclados con base en su composición y en el uso al cual será dado:

- La norma suiza 670062 Recycling - Allgemeines, registrada por Asociación Suiza de Normalización y editada por la Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (Unión de los Profesionales Suizos de la Carretera);
- La norma holandesa BRL 2506 (Directiva Nacional de Evaluación para la certificación de producto KOMO de áridos reciclados procedentes de RCD);
- En Austria, la Directriz para Materiales de Construcción reciclados publicada por la Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe ÖGSV (Asociación Austriaca de Protección de la Calidad de los Materiales Reciclados de Construcción);
- El conjunto de normas portuguesas desarrollado por el MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. En especial la “E 471 – 2006. Especificação LNEC: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos”, que especifica el uso de áridos reciclados en hormigón.

La tabla 3.3 presenta algunos ejemplos de clasificación por composición, que se basan en las clasificaciones de materiales propuesta por la norma UNE-EN 933-11:2009.

Mientras las clasificaciones propuestas por el Proyecto GEAR y por la norma alemana DIN 4226-100 son de uso general, la clasificación de la norma portuguesa LNEC E471-2006 es una clasificación para áridos reciclados destinados al uso en hormigón, y la clasificación de las recomendaciones de GIASA es volcada para áridos reciclados destinados al uso como zahorra artificiales y material granular para grava cemento.

En este trabajo, el árido grueso reciclado constituido por material cerámico será denominado “árido reciclado cerámico” mientras el árido grueso reciclado constituido por hormigón, mortero y/o árido natural será denominado “árido reciclado de hormigón”.

**Tabla 3.3. Algunas propuestas de clasificaciones de áridos reciclados por composición existentes en la bibliografía**

Propuesta	Proyecto GEAR (2010)		LNEC E471 (2006)		GIASA (2010)		DIN 4226-100 (2002) citado por Müller (2005)	
Clasificación propuesta	Ar H	Rc+Ru≥90% Rb≤10% Ra≤5% X+Rg≤1%	ARB1	Rc+Ru≥90% Rb≤10% Ra≤5% X+Rg≤0,2% FL≤1cm <sup>3</sup> /kg	ZR HORM (uso como zahorra artificial)	Rc≥90% Rb≤10% Ra≤5% FL≤5cm <sup>3</sup> /kg	Tipo 1 (árido de hormigón y arena triturada)	Rc+Ru≥90% Rb≤10% Otros minerales≤2% Ra≤1% X+Rg≤0,2%
	ArM H	Rc+Ru≥70% Rb≤30% Ra≤5% X+Rg≤1%	ARB2	Rc+Ru≥70% Rb≤30% Ra≤5% X+Rg≤0,5% FL≤1cm <sup>3</sup> /kg	ZR RCD (uso como zahorra artificial)	Rc≥70% Rb≤10% Ra≤1% FL≤10cm <sup>3</sup> /kg	Tipo2 (árido de construcción y arena triturada)	Rc+Ru≥70% Rb≤30% Otros minerales≤3% Ra≤1% X+Rg≤0,2%
	ArM C	Rc+Ru≤70% Rb>30% Ra≤5% X+Rg≤1%	ARC	Rc+Ru+Rb≥90% Ra≤10% X+Rg≤1% FL≤1cm <sup>3</sup> /kg	GCR HORM (uso en grava- cimiento)	Rc≥90% Rb≤10% Ra≤1% FL≤2cm <sup>3</sup> /kg	Tipo 3 (árido de albañilería y arena triturada)	Rc+Ru≥20% Rb(Clinker, sin ladrillos de arcilla porosa)≤80% Rb (ladrillos de silicato de calcio) ≤5% Otros minerales≤5% Ra≤1% X+Rg≤0,5%
	ArM A	5%<Ra≤30% X+Rg≤1%	-	-	-	-	Tipo 4 (árido mixto y arena triturada)	Rc+Ru+Rb≥80% Ra + Otros minerales≤20% X+Rg≤1%

En los puntos siguientes, se presenta las principales propiedades de esos dos tipos de elementos que suelen componer la mayor parte de una muestra / acopio de árido reciclado.

### 3.3.1 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN

Los áridos reciclados de hormigón suelen presentar baja densidad, alta porosidad y absorción de agua, además de alto coeficiente de desgaste Los Ángeles.

Su empleo en hormigones puede implicar en una relación agua/cemento (a/c) mayor y un aumento de la porosidad. En consecuencia, se puede generar efectos negativos en las propiedades del hormigón producido relacionadas con la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

Según ACHE (2006) y Alaejos Gutiérrez (2008), los diversos estudios existentes sobre áridos de hormigón indican que:

- La densidad de hormigones reciclados hechos con árido reciclado de hormigón suele ser menor que la de hormigones convencionales. En consecuencia, tanto la absorción como la porosidad de un hormigón reciclado suelen aumentar;

- Los valores de resistencia a compresión y de módulo de elasticidad de esos hormigones reciclados, en general, son inferiores a los presentados por hormigones convencionales equivalentes, con igual relación agua/cemento. Esos valores tienden a disminuir con el aumento del contenido de árido reciclado utilizado o con el uso de árido fino reciclado;
- El hormigón fresco reciclado necesita mayor cantidad de agua que su equivalente hecho con árido convencional. Para la obtención de un mismo valor de resistencia, el consumo de cemento debe ser algo mayor;
- El uso de cantidades importantes de áridos reciclados representa un aumento considerable en la retracción por secado y la fluencia del hormigón. En comparación con el comportamiento presentado por un hormigón convencional equivalente, los incrementos son especialmente acentuados en los hormigones reciclados hechos con 100% de árido grueso reciclado;
- Hormigones reciclados de hormigón presentan un comportamiento frente a la resistencia a helada inferior al presentado por hormigones convencionales. Este comportamiento se debe a la mayor permeabilidad del hormigón reciclado y a la elevada absorción de los áridos reciclados. La mayor porosidad implica, en caso de saturación, en la absorción de un mayor volumen de agua, y, por consecuencia, a la mayor susceptibilidad del hormigón al deterioro por heladas. Se debe resaltar que la resistencia a helada del hormigón reciclado depende de la resistencia a helada del hormigón original y de la dosificación del nuevo hormigón. Hormigones hechos con áridos reciclados originarios de hormigones resistentes a heladas pueden dar lugar a hormigones reciclados con buen comportamiento frente a este tipo de deterioro;
- El uso de áridos reciclados de hormigón pueden implicar problemas en la durabilidad del material. En especial, respecto a la carbonatación, el árido reciclado puede servir como un foco de propagación ya que no imposibilita el paso del  $\text{CO}_2$  como un árido convencional. La durabilidad del hormigón reciclado con un contenido máximo de 20% de árido grueso reciclado de hormigón es similar a la de un hormigón convencional. Debido a su porosidad, sin embargo, no se recomienda el uso de sustituciones por encima del 20% o en ambientes agresivos.

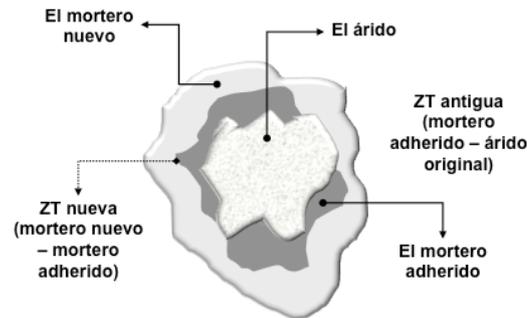
Estas diferencias en el comportamiento de hormigones reciclados y convencionales pueden estar relacionadas con la mayor porosidad de los áridos reciclados, existente en función de la capa adherida de mortero antiguo que suelen presentar.

De acuerdo con ACHE (2006), los resultados habituales encontrados en la bibliografía indican que la fracción gruesa de áridos reciclados de hormigón entre 10 y 20 mm suele tener entre 23 y 52% de mortero adherido, mientras que la fracción fina entre 5 y 10 mm oscila entre 32 y 61% (Hansen y Narud, 1983; Nishbayashi y Yamura, 1988; Kaga y col., 1988; RILEM, 1992; Barra, 1996; Limbachiya y col., 2000; Sánchez de Juan, 2004).

Es importante destacar que la resistencia del hormigón original no tiene una influencia importante en la cantidad de mortero adherido al árido grueso. Por otra parte, si la calidad del mortero adherido es alta lo suficiente, las limitaciones presentadas por la resistencia son provenientes del árido original o del nuevo mortero (Hansen y Narud, 1983; Ravindrarajah y Tam, 1985; Mulheron y O'Mahony, 1988; RILEM, 1992).

La Figura 3.2. presenta un esquema del árido reciclado incorporado en un hormigón. En ella, es posible observar la presencia de tres zonas de transición en un hormigón hecho con árido reciclado: la existente entre el árido original y el mortero adherido, entre el mortero adherido y el mortero nuevo y entre el mortero nuevo y el árido original.

Algunos estudios (Ryu, 2002; Otsuki y col., 2003) analizan cuantitativa y visualmente las interfaces existentes en los áridos reciclados de hormigón con el objetivo de evaluar su influencia en las propiedades del hormigón generado. Ambos estudios utilizaron el ensayo del micro durómetro Vickers para medir la micro dureza de las zonas de transición del árido reciclado.



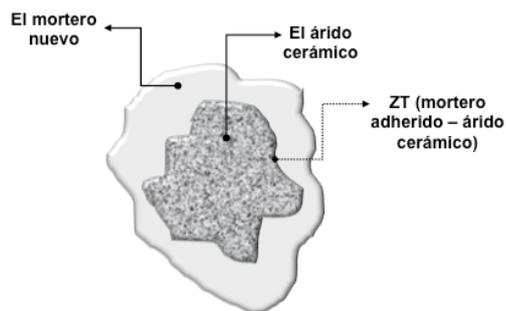
**Figura 3.2. Figura esquemática del árido reciclado de hormigón**

Ryu (2002) no identifica diferencias significativas en el valor de dureza Vickers entre los áridos reciclados estudiados y el árido de referencia. No obstante, se percibe que el valor de dureza Vickers en la zona alrededor del árido reciclado disminuye cuando la relación agua cemento crece.

Por otro lado, Otsuki y col. (2003) utilizó la prueba de micro dureza Vickers para evaluar la relación de la resistencia a compresión de los áridos reciclados con las zonas de transición nueva (zona entre el mortero nuevo y el mortero adherido) y antigua (zona entre el árido original y el mortero adherido), considerando diferentes relaciones agua/cemento. En estos estudios los resultados indican que la resistencia a compresión del hormigón es determinada por la debilidad de la zona de transición, tanto la nueva como la antigua. Las características de la zona de transición nueva son influenciadas por la calidad del nuevo mortero. Ya las características de la zona de transición antigua son influenciadas por la calidad del mortero adherido, independiente de su cantidad. Es decir que la debilidad del hormigón reciclado estará en la zona de transición antigua solo en el caso de la calidad del mortero adherido ser inferior a la del nuevo mortero.

### 3.3.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS CERÁMICOS

Mientras las propiedades de los áridos reciclados de hormigón se determinan por la cantidad de mortero adherido existente y el hormigón original, las propiedades de los áridos reciclados cerámicos se determinan por las características de la matriz cerámica (figura 3.3).



**Figura 3.3. Figura esquemática del árido reciclado cerámico**

Los estudios existentes sobre el empleo de áridos cerámicos o mixtos en hormigón indican que:

- Las resistencias a compresión, a tracción y a flexión de los hormigones reciclados, en general, son menores cuando se comparan con los hormigones de referencia (Brito y col., 2005; Senthamarai y Devadas Manoharan, 2005; Correia y col., 2006; Khalaf, 2006). En otros estudios, sin embargo, se obtienen resistencias a compresión y a tracción mayores (Akhtaruzzaman y Hasnat, 1983; Khaloo, 1994; Mansur y col., 1999). Khaloo (1994) atribuye la obtención de esos resultados a la mejor conexión conseguida entre la pasta de cemento y el árido cerámico, aspecto que debe ser estudiado a fondo;
- Alaejos Gutiérrez (2008) indica que para alcanzar un mismo valor de resistencia, el contenido de cemento del hormigón reciclado debe ser superior al de un hormigón convencional, principalmente en el caso de uso de la fracción fina (0/4 mm) de los escombros de albañilería triturada. Para hormigones ligeros hechos con áridos reciclados cerámicos sin finos, el contenido de cemento puede presentarse entre 130 y 170 kg/cm<sup>3</sup>, aunque se recomienda utilizar valores entre 200-230 kg/m<sup>3</sup>;
- Debido a la textura rugosa de la superficie del ladrillo triturado, el hormigón reciclado cerámico presenta una peor trabajabilidad (Alaejos Gutiérrez, 2008);
- La aplicación de los áridos cerámicos en hormigones no estructurales es viable del punto de vista mecánico (ya que el hormigón reciclado cerámico alcanza resistencias a compresión y a tracción suficientes), y de la durabilidad, (ya que la posible facilidad de penetración de agentes agresivos en el hormigón reciclado cerámico no es un aspecto restrictivo para el uso no estructural) (Akhtaruzzaman y Hasnat, 1983; Brito y col., 2005; Correia y col., 2006);
- En general, esos hormigones reciclados tienen módulo de elasticidad menor (Khalaf y De Venny, 2004; Senthamarai y Devadas Manoharan, 2005; Alaejos Gutiérrez, 2008). Hansen y col. (1992) indican que los valores de módulo de elasticidad están entre 50 y 75% del valor presentado por hormigones convencionales con misma resistencia. Por otra parte, Hansen y col. (1992) han producido hormigones reciclados cerámicos con propiedades equivalentes al hormigón de referencia en análisis al incrementar 20% de cemento en su dosificación;
- Es necesario reducir la problemática generada por la alta absorción del árido cerámico, a través de la realización de procedimientos de pre-saturación de los áridos (Hansen y col., 1992; Khalaf y De Venny, 2004; Brito y col., 2005; Correia y col., 2006; Khalaf, 2006). Barra (1996) indica la posibilidad de reducir esta problemática a través de la introducción del árido grueso y agua en

la hormigonera, antes de los demás materiales. La orden de introducción de los materiales a adoptarse, sin embargo, dependerá del coeficiente de absorción efectivo del árido, ya que el procedimiento puede influir negativamente o positivamente a depender de esta característica (el aumento de la relación agua/cemento puede facilitar la adherencia pasta-árido pero, en contrapartida, disminuir su calidad);

- Los hormigones reciclados presentan una buena estabilidad térmica y resistencia a la helada, debido a la baja conductividad térmica de los áridos cerámicos (Hansen y col., 1992; Barra, 1996; Khalaf y De Venny, 2004). Varios estudios indican que el comportamiento a la helada de los hormigones reciclados cerámicos es similar a los convencionales (Kashino y Takahashi, 1988; Kobayashi y Kawano, 1988; Merlet y Pimienta, 1994; Limbachiya y col., 1998; Mulheron y O'Mahony, 1998; Kikuchi y col., 1998). Alaejos Gutiérrez (2008), por otra parte, indica que la resistencia a las heladas del hormigón con ladrillos triturados puede ser inadecuada, debido a la producción de una intensa descamación sobre los áridos cercanos a la superficie del hormigón;
- Los hormigones reciclados cerámicos presentan buen comportamiento frente a la resistencia a abrasión. Indican fuerte aptitud para aplicación en placas de pavimentos y demás elementos de hormigón, donde la resistencia a abrasión es más importante que la resistencia mecánica (Correia y col., 2006);
- Debido a la porosidad del árido reciclado cerámico, la velocidad de carbonatación de hormigones reciclados hechos con ese material es mayor que en hormigones normales. El incremento de cemento puede, sin embargo, reducir este efecto (Alaejos Gutiérrez, 2008);
- Los áridos cerámicos poseen buen potencial para la aplicación en hormigones de baja densidad y con aire incorporado (Khalaf, 2006).

No se ha identificado estudios específicos sobre la evaluación de la durabilidad de hormigones reciclados hecho con áridos reciclados cerámicos. Se presume, sin embargo, una conducta desfavorable en relación al hormigón convencional, debido a la alta porosidad del árido reciclado cerámico.

### 3.4 MODO DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN ESPAÑA

El modo de producción de los áridos reciclados es un aspecto muy importante para viabilizar su uso en hormigón, ya que los procesos de clasificación, trituración y limpieza contribuyen directamente para la obtención de un árido de mejor calidad.

El reciclaje de RCD en España puede hacerse en instalaciones fijas, en gran parte ubicadas en los mismos vertederos de inertes que sirven a la ciudad, o en instalaciones móviles, ubicadas en la propia obra generadora del residuo.

Corroborada por Serna (2010), la tabla 3.4 indica que, por lo general, cada planta de reciclaje española tiene un sistema de producción exclusivo que se compone por todas o algunas de las etapas enseñadas en la tabla. En común, estas plantas tienen como objetivo la producción del árido

reciclado con granulometría y composición definidas. La selección y complejidad del sistema de producción adoptado varía en función de la necesidad de procesar RCD.

**Tabla 3.4. Esquema general de procesos de una planta de reciclaje tipo española (Proyecto GEAR, 2010)**

Etapa	Tipo de proceso	Proceso
Control de entrada	Manual	Control organoléptico inicial (color, olor y textura)
	Manual y/o informático	Documentación de origen
	Manual	Identificación de contaminaciones
	Manual y/o informático	Pesaje
	Manual	Definición de acopios específicos por material de entrada
Pre tratamiento (separación de entrada)	Manual	Separación manual en acopio
	Mecánico	Separación mecánica en acopio (uso de martillos, palas y retroexcavadoras)
Pre cribado	Mecánico	Alimentador pre-cribador
		Tromell
Clasificación y limpieza	Manual	Cabina de triaje
	Mecánico	Tromell
		Electroimanes
		Lavadoras
		Sopladores
		Ciclón
Trituración Primaria o secundaria	Mecánico	Mandíbula
		Impacto
		Conos
Cribado	Mecánico	Cintas y criba

Tanto la cantidad de impurezas que contenga el residuo a ser procesado como la aplicación final deseada para el material reciclado determinan la estrategia de producción. Cada planta busca el equilibrio entre los costes del proceso y la calidad del árido que se desea producir, definiendo hasta que punto se debe utilizar los mecanismos de eliminación de impurezas. El diseño del proceso de producción de áridos reciclados para aplicación en hormigón, por ejemplo, es diferente del que requiere el proceso de producción de áridos reciclados para aplicación en relleno o sub bases en firmes para carreteras. Cada planta busca producir productos que tienen mejor salida y aceptación en su área de influencia.

Según datos facilitados por el Proyecto GEAR, actualmente existen cerca de 150 plantas fijas o semifijas y cerca de 300 plantas móviles emplazadas en distintos puntos del país. Según el diagnóstico realizado por el Proyecto GEAR (2010):

- La mayor parte de las plantas de reciclaje analizadas son fijas y semi móviles (63% y 25%, respectivamente), siendo que gran parte de las instalaciones semi móviles actúan en tiempo

integral como fijas. Se han caracterizado como semi móviles por presentar al menos un equipo móvil, que eventualmente puede desplazarse a operar fuera de la planta;

- Prácticamente todas las plantas de reciclaje analizadas tienen sistema de clasificación y trituración (cerca de 92% y 90%, respectivamente), pero solo 74% presentan sistemas de limpieza sea por aire y/o por agua. Ninguna planta móvil analizada ha presentado sistema de limpieza;
- La mayor parte de los sistemas de reciclaje analizados son compuestos por uno o varios tipos de trituración en los que se han identificado diferentes tipos de maquinaria. La elección de los tipos a emplear depende principalmente de tres factores: consumo de energía, coste de producción y calidad del producto. Cerca de 46% de las plantas analizadas presentan tanto trituración primaria como secundaria, mientras que 44% presentan solo trituración primaria. Solo 10% del total de plantas no ha presentado sistema de trituración.

El tipo de trituración, en especial, tiene un importante papel en la producción de áridos reciclados para uso en hormigón. Mediante sucesivos procesos de machaqueo se puede reducir considerablemente la cantidad de mortero adherido existente en los áridos reciclados de hormigón.

Según Yagishita y col. (1994), por medio de un proceso de trituración empleando machacadora de impacto, el árido grueso de hormigón resultante puede presentar de 35 a 40% de mortero. Con una segunda trituración, aplicada a este material, mediante machacadora de rodillo, este porcentaje se redujo de un 17 a 26%. Con la ejecución de una tercera etapa también con la machacadora de rodillo, se puede finalmente obtener un árido con un 7-10% de mortero adherido.

No obstante, aun que la aplicación de más de un nivel de machaqueo produzca áridos de mejor calidad, la cantidad de finos producidos en el proceso tienen un importante incremento. Nagataki y col. (2000) identifican que procesos compuestos únicamente por la trituración primaria producen una cantidad final de 60% de áridos gruesos en relación al total original de residuos de hormigón. Por otro lado, procesos compuestos por dos y tres niveles de machaqueo producen apenas 45% y 35%, respectivamente.

Por la otra parte, la granulometría de los áridos reciclados provenientes del machaqueo de RCDs depende fundamentalmente del tipo de trituración al cual se ha sometido. La fracción gruesa producida por las plantas productoras de árido reciclado presenta generalmente un coeficiente de forma, un índice de lajas y una granulometría adecuadas para el empleo del material en hormigón.

La calidad del hormigón original puede influenciar el módulo granulométrico del árido reciclado. En general, al considerar el mismo sistema de trituración, áridos reciclados originados a partir de hormigones de mayor resistencia presentan módulos granulométricos ligeramente superiores a los originados a partir de hormigones menos resistentes (Nishbayashi y Yamura, 1988; Kaga y col., 1988; Kakizaki y col., 1988; Kikuchi y col., 1998).

De la misma forma, el árido reciclado cerámico presenta mejores resultados cuando es sometido a un segundo proceso de trituración. La realización de una segunda etapa de machaqueo, tanto con machacadora de rodillo como con de impacto, permite mejorar la forma laminar y angulosa del árido reciclado cerámico, dejándolo más esférico y menos laminar.

Otro punto importante se refiere a los sistemas de clasificación y limpieza. Debe hacerse hincapié en que la falta de un sistema correcto de clasificación y limpieza puede inviabilizar la aplicación en hormigón de un árido reciclado con calidad potencial para este objetivo.

Tanto en la etapa de clasificación como en la etapa de limpieza existentes en las plantas españolas, el objetivo es la separación de los materiales pétreos (hormigón, ladrillo, albañilería y cerámica) de los no pétreos (metales, madera, plásticos, etc.) que componen el RCD.

La tabla 3.5 presenta un resumen de los principales componentes perjudiciales existentes en el RCD producido en España, las limitaciones de contenido exigidas por la EHE (2008) y los sistemas de clasificación y limpieza existentes en las plantas españolas que objetivan específicamente a su eliminación.

**Tabla 3.5. Componentes perjudiciales del RCD para la producción de áridos reciclados para hormigón**

Impurezas	Propiedades Específicas	Diferencia existente	Origen	Limitación exigida por la EHE (2008) en % por peso total	Sistemas de clasificación y limpieza relacionados
Tierra y arena	Fracción fina (<4mm) lavable	Tamaño de la partícula	Proceso de tamizado	1,5% de áridos menores que 0,063 mm	Pre cribado
Contaminantes orgánicos	Ligero	Hidrofilia de la partícula y densidad		1%	Separación manual y limpieza por aire y por agua
Madera, papel y plásticos	Ligeros y, generalmente, grandes	Peso, tamaño y densidad	RCD original	1%	Separación manual y limpieza por aire y por agua
Material férrico (Hierro y acero)	Magnético	Susceptibilidad magnética	Hormigón		Separación magnética y manual
Material no-férrico (Al, Cu, Zn, Pb y latón)	Metal no magnético	Propiedad no magnética	RCD original		Separación manual
Yeso	Mas pesado que el hormigón y la cerámica	Densidad	RCD original		Separación manual y limpieza por aire y por agua

Sobre todo, en España, los sistemas de clasificación más usuales son la separación magnética y manual. Por otro lado, algunos sistemas existentes se destacan por su eficiencia en algunos casos. Deben estar implementados en plantas que produzcan áridos reciclados para hormigón y que presenten problemas asociados a la presencia de finos y yeso en el RCD de entrada. Según el Proyecto GEAR, 2010:

- El proceso de pre cribado de finos es considerado bastante eficiente porque contribuye para la optimización del uso y del mantenimiento de los equipos de clasificación y trituración de la planta. Además se observa que la existencia de ese proceso contribuye directamente para la calidad de los áridos producidos. Prácticamente actúa como una limpieza del material de

entrada, eliminando los finos considerados sucios y/o de calidad inferior a los producidos al final del proceso de machaqueo del RCD clasificado y limpio. Solo cerca de 64% de las plantas analizadas han presentado sistemas de pre cribado;

- La mayoría de las plantas de reciclaje analizadas por el proyecto (cerca de 61% del total) utiliza sistemas de limpieza por aire, mientras solo 26% presentan sistemas de limpieza por agua. Se observa que la técnica a base de agua proporciona una calidad mejor del árido, que contribuye directamente para reducir la presencia de contaminantes como sulfatos y yeso. El uso de sistemas por aire es más común, en función de la complejidad de los sistemas hidráulicos y al aspecto económico inherente a eso.

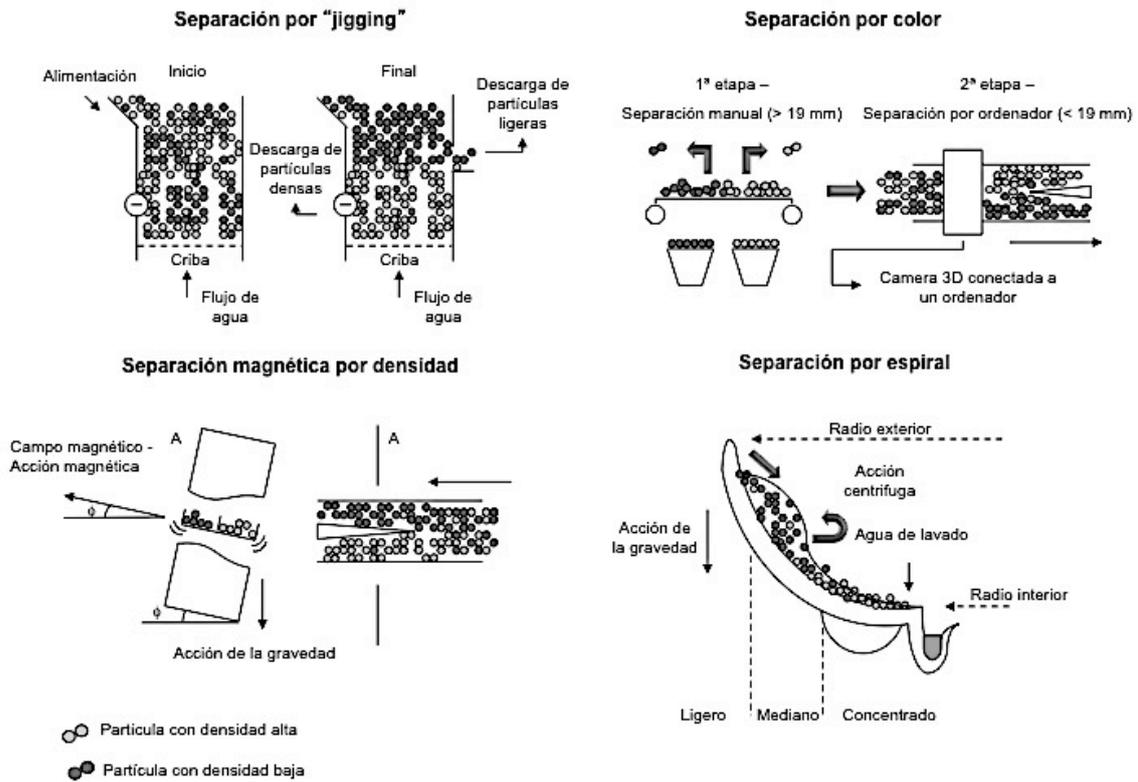
Del mismo modo, la EHE (2008) indica limitaciones para los áridos pétreos cerámicos y bituminosos. En la referida instrucción, la presencia de elementos cerámicos en los áridos reciclados solo es permitida hasta un 5% del peso total, mientras que la presencia de elementos asfálticos no debe ultrapasar el contenido de 1%.

Esta limitación inviabiliza que gran parte de los áridos reciclados producidos en España sea utilizada en hormigón, ya que las plantas de reciclaje españolas que reciben RCD de carácter mixto no tienen sistemas de separación entre los elementos pétreos que componen el RCD.

Müller (2005) indica que dos conceptos de tratamiento de áridos reciclados de hormigón deben ser considerados para la mejora de su calidad en el uso en hormigón:

- Tratamiento del RCD para la remoción de la pasta de cemento adherida en los áridos reciclados por técnicas sostenibles de liberación y separación:
  - Liberación mecánica: Métodos basados en la aplicación de esfuerzos abrasivos en hormigones pre-triturados. Las propiedades del material tratado por estos métodos se comparan a las propiedades de los áridos naturales utilizados en el hormigón original. La densidad aparente del material tratado puede alcanzar el 96% de la densidad de los áridos naturales;
  - Liberación térmica: Métodos basados en la aplicación de esfuerzos térmicos (el hormigón triturado se calienta en un horno rotatorio a 700°C, y la separación de los distintos componentes ocurre según su balance de masa) y métodos basados en la aplicación de tensiones generadas por flujo de cavitación (crecimiento y implosión de burbujas de gas en un líquido). Para este último método, se debe resaltar que la erosión de la cavitación, con un tiempo de exposición de sólo 10 segundos, causa daños considerable en el hormigón. El grado de separación debe ser entre 46 y 100%;
  - Separación por tamaño de partícula o densidad;
- Ajustes tecnológicos en la producción del hormigón reciclado: ajustes en la dosificación (adición de cenizas volantes, humo de sílice o áridos de hormigón en polvo), cambios en los procedimientos de mezcla y mejora de las condiciones de curado del hormigón reciclado.

Hendriks y Jassen (2004) realizaron una evaluación de la eficiencia de tecnologías que tienen el objetivo de separar los elementos de hormigón y de los elementos cerámicos. En este estudio, se ha evaluado los siguientes métodos: separación magnética, jigging, humphrey spiral y separación por color (Figura 3.4).



**Figura 3.4. Métodos de separación de elementos de hormigón, mortero y pétreos de elementos cerámicos**

Según los autores, las experiencias efectuadas con separación magnética han permitido obtener un árido cerámico y un de hormigón y mortero con purezas, respectivamente, del 93% y 87%. Los resultados obtenidos por las demás técnicas indican que:

- la separación por jigging presenta buena eficiencia en separar residuos de hormigón de los cerámicos y anhidritas, y residuos cerámicos de los de yeso. Sin embargo, indican una cierta debilidad del método en separar residuos de hormigón de los de yeso;
- la separación por espiral es un método sencillo y de bajo costo. Es considerado viable para el tratamiento de materiales finos (< 3 mm). Por otro lado, para la obtención de un producto final de calidad, el material de entrada no puede presentar materiales impropios como metales pesados o orgánicos;
- la separación por color presenta excelente eficiencia en separar residuos de hormigón de los cerámicos. Sin embargo, debido al alto costo del proceso, el método no es viable para la aplicación en grandes cantidades de material.

En ese contexto, con base en la normativa actual, se observa la necesidad de mejorar la tecnología del reciclaje de RCD en España para promover el incremento de la producción de áridos reciclados para hormigón en el país.

Por otra parte, la inviabilidad tecnológica actual de separar elementos de hormigón y cerámicos en las plantas y la alta producción de RCD mixto en España indican la importancia de realizarse estudios que analicen la viabilidad de uso de áridos reciclados mixtos en esta aplicación.

El uso de áridos reciclados mixtos en la producción de hormigón genera un valor añadido al árido reciclado en España, que contribuye efectivamente para la consolidación del reciclaje de RCD en el país.

### 3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

El uso de áridos reciclados como materia prima en la construcción civil es una acción sostenible de gran importancia para el sector. Los beneficios van desde el ahorro de recursos naturales y de emisiones de CO<sub>2</sub> hasta la reducción de la producción de contaminantes y la economía de energía y espacios de vertido.

El uso en hormigones se diferencia en relación a los demás usos difundidos, pues promueve el cierre ideal del ciclo de vida de un árido, creando un mayor valor añadido al reciclaje.

El reciclaje de RCD en España ya es una actividad consolidada, aunque que sigue en desarrollo. Según el Proyecto GEAR (2010), las plantas de reciclaje en España:

- Poseen el mismo concepto básico de instalaciones de producción de áridos naturales. Fundamentalmente las plantas presentan los mismos elementos que la industria minera (machacadoras, cribas y mecanismos transportadores).
- Requieren, además, equipos para la eliminación de contaminantes que, en el caso de las plantas más sencillas, se limita al uso de electroimanes para la separación de elementos férricos. Las plantas de producción de áridos reciclados pueden incluir también sistemas de limpieza por agua y aire.

La gama y características de las plantas y procesos de reciclaje son muy amplias y responde a situaciones y objetivos muy diversos. Desde la instalación más sencilla, hasta la más compleja, en general el sistema es escogido con base en factores claves para alcanzar la calidad de los productos deseada, considerando el RCD recibido en la planta.

Se nota una tendencia de la iniciativa privada en el diseño, construcción y explotación de plantas de reciclaje y de depósitos de inertes. Esto contribuye para acelerar e incrementar el porcentaje futuro de material reciclado producido en el país.

Actualmente, la producción de hormigón reciclado en España es determinada por las recomendaciones de la EHE (2008). A efectos de esta instrucción, el uso de árido reciclado se restringe a una sustitución máxima de 20% de la fracción gruesa de los áridos, con material procedente del reciclado de hormigón convencional de calidad comprobada.

Por otra parte, debido a las características del sector de la construcción en España, la producción de áridos reciclados de carácter mixto (compuestos tanto por áridos reciclados de hormigón como áridos reciclados cerámicos) es más importante que la de áridos reciclados compuestos exclusivamente por áridos reciclados de hormigón.

Mientras que el uso del árido reciclado de hormigón en hormigones estructurales está ya aceptado desde hace algunos años, el uso del árido reciclado cerámico suele estar limitado a bases de pavimentos y, en algunos casos, a elementos no estructurales (Khalaf y De Venny, 2004).

Esto se debe a la escasez de estudios destinados a la evaluación del empleo de áridos cerámicos en hormigón y a la inexistencia de normativas consolidadas relacionadas con el tema. La frecuente presencia de impurezas en los RCDs mixtos (con posibles efectos deterioros en la resistencia y la durabilidad del hormigón) y de la característica ya comprobada de estos áridos de poseer alta absorción contribuyen para eso (Khalaf, 2006).

Se percibe la importancia en establecer directrices y realizar estudios que tengan el objetivo de promover el uso de áridos reciclados en hormigón, incluyendo los de carácter mixto.

En este contexto, el modo de producción de los áridos reciclados tiene un importante papel. Entre los condicionantes técnicos, es importante destacar la necesidad de:

- el cuidado necesario con la segregación y preparación del material de origen, incluyendo el control del origen de los RCDs. El uso de residuos de hormigón y mortero provenientes de estructuras con patologías o especiales puede influenciar negativamente en la calidad del árido reciclado producido;
- el uso de un sistema de producción con métodos de clasificación, trituración y limpieza coherentes con las necesidades de tratamiento del RCD recibido en planta. Se debe tener en cuenta las ventajas de realizar el reciclado "in situ", a través del uso de plantas móviles. El reciclaje in situ contribuye significativamente para evitar innecesarios costes de transporte, referentes tanto al traslado de los residuos a la planta de reciclaje como a los vertederos autorizados. Además permite proporcionar un posible suministro de áridos reciclados a puntos de consumo próximos a la obra. En estos casos, sin embargo, se debe garantizar que el sistema de producción de la planta móvil, generalmente más sencillo, es suficiente para generar áridos reciclados dentro de la calidad esperada.

Por fin, debe hacerse hincapié en la importancia de garantizar una calidad constante del producto reciclado en planta, a través de ensayos de control de calidad frecuentes. Las normativas actuales de producción de áridos reciclados ni siempre tienen fácil aplicación en las plantas de reciclaje de RCD. Esto se debe al carácter heterogéneo de la composición de los RCD, la variabilidad de las propiedades de los áridos producidos y la dificultad en mantener un control efectivo del origen del residuo recibido en planta.



# CAPÍTULO 4

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El estudio propuesto consiste en medir la sostenibilidad de hormigones estructurales reciclados a través de un análisis comparativo entre hormigones hechos con áridos reciclados y áridos naturales (figura 4.1).

Los hormigones reciclados objeto del análisis han sido producidos con distintos contenidos de áridos gruesos reciclados (20%, 50% y 100%) en sustitución de áridos naturales.

Se han utilizado un árido reciclado de hormigón y otro de composición mixta (compuesto tanto por elementos de hormigón y mortero, como por elementos cerámicos). También se ha producido un hormigón sin árido reciclado, utilizado como hormigón de referencia.

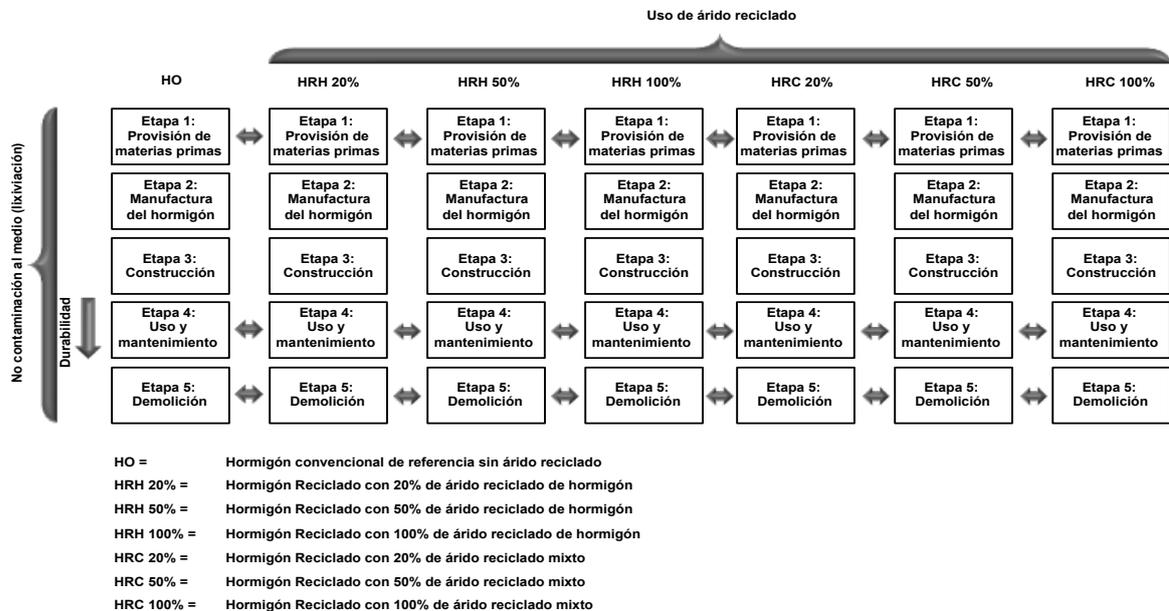


Figura 4.1. Análisis comparativo propuesto en el trabajo

Para este estudio se ha considerado esencialmente los aspectos de durabilidad e impacto ambiental por lixiviación. De esta manera, las diferencias de balance ambiental existentes en la etapa de provisión de materias primas no se han consideradas relevantes en el análisis global.

En el modo de producción de todos los hormigones utilizados en este trabajo se han seguido los mismos procedimientos. Los análisis realizados siempre consideran que los usos dados a los hormigones se equivalen.

El plan de trabajo realizado para este estudio es presentado en la figura 4.2.

Todos los ensayos han sido realizados en muestras representativas del material. En la toma de las muestras para ensayo se ha seguido el procedimiento indicado en la norma UNE EN 932-2:1999.



**Figura 4.2. Plan de trabajo realizado**

La metodología para la evaluación y medida de la sostenibilidad de los hormigones reciclados producidos en este trabajo se ha basado en la aplicación de los siguientes índices:

- **Vida Útil Total:** Índice que determina el tiempo en años que el hormigón en análisis permanecerá en la actividad para la que ha sido diseñada. El índice de vida útil total corresponde al menor valor obtenido entre los indicadores de vida útil calculados para los parámetros de durabilidad de carbonatación y penetración de cloruros analizados en este trabajo. El desarrollo de esos indicadores se ha basado en modelos matemáticos de previsión de vida útil disponibles

en la bibliografía, escogidos a partir de las condiciones de escenario/proyecto pre determinadas en el trabajo;

- Emisiones de Contaminantes: Índice que determina si el hormigón produce emisiones de contaminantes en cantidad suficiente para generar algún impacto ambiental al medio. Se calcula a partir de indicadores que determinan la cantidad total de un contaminante emitido por unidad de peso del producto. Los indicadores de emisiones de contaminantes han sido obtenidos a través de la realización de ensayos de lixiviación disponibles en la bibliografía. Estos ensayos han sido escogidos en función del conocimiento previo existente sobre el material en análisis y de las condiciones de escenario/proyecto pre determinadas en el trabajo.

En el marco de este estudio, se considera por simplificación que el uso de hormigón reciclado representará una solución más sostenible o equivalente que el uso del hormigón convencional correspondiente, siempre y cuando ambos índices cumplan con las siguientes condiciones:

- Al analizarse el Índice de Vida Útil Total, el valor obtenido es igual o superior al valor obtenido por un hormigón convencional correspondiente.
- Al analizarse el Índice de Emisiones de Contaminantes, los valores obtenidos para cada elemento en análisis son iguales o inferiores a los límites máximos establecidos en la normativa de uso.

El esquema de la metodología propuesto en este trabajo se presenta en la figura 4.3.

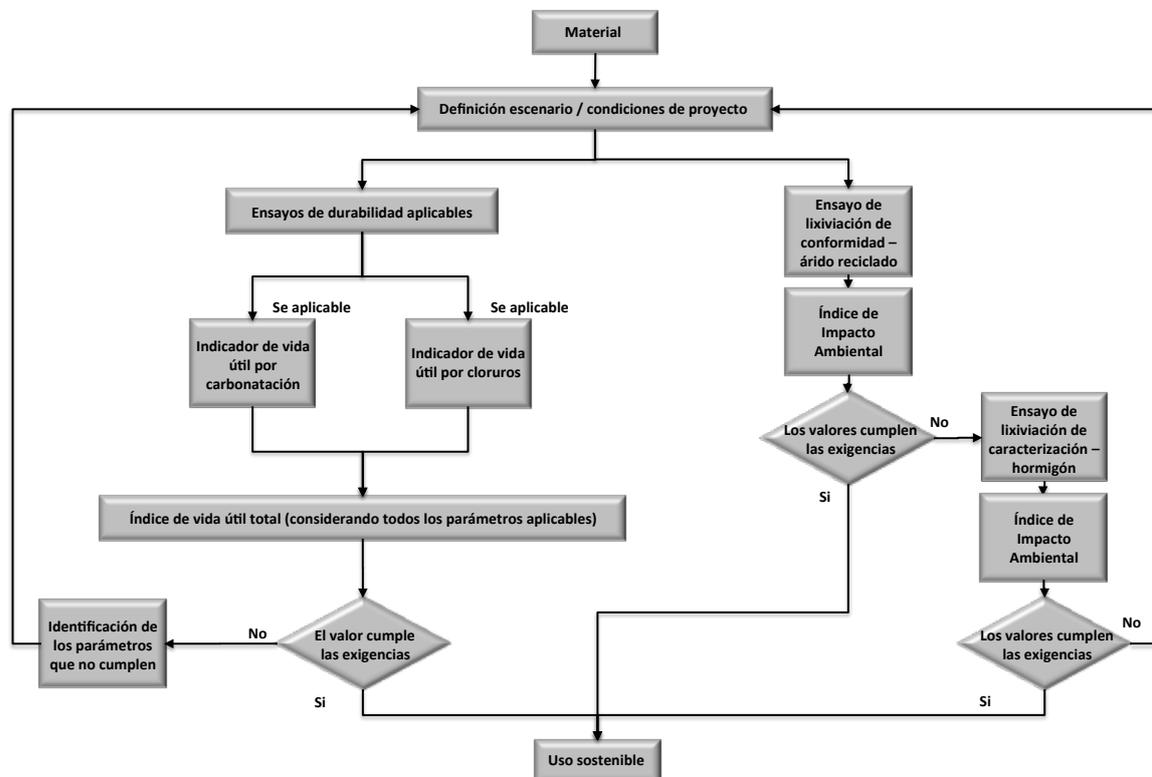
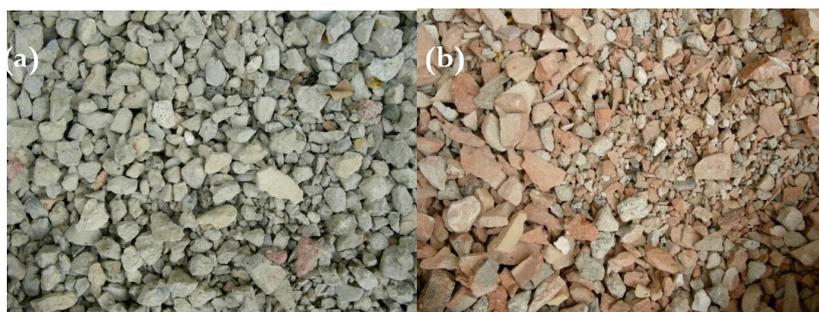


Figura 4.3. Metodología para análisis de la sostenibilidad de hormigones reciclados propuesta en el trabajo

## 4.2 MATERIALES UTILIZADOS

Para la realización del estudio se han adoptado un tipo de árido reciclado de hormigón y un tipo de árido reciclado de carácter mixto, ambos de fracción gruesa (6/20 mm), identificados en el trabajo por las respectivas siglas **AH** y **AC** (figura 4.4).

La elección de utilizar solo la fracción gruesa de los áridos reciclados se basa en las recomendaciones prescritas por la EHE (2008) para hormigones estructurales.



**Figura 4.4. (a) Árido reciclado de hormigón AH y (b) árido reciclado mixto AC**

Estos dos áridos fueran originados de dos plantas de reciclaje distintas, ambas debidamente registradas en el Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos. Las dos plantas poseen el marcado CE y producen en escala comercial los áridos reciclados utilizados en el trabajo. Los demás áridos utilizados en la producción de los hormigones reciclados y de referencia tienen carácter convencional.

### 4.2.1 MODO DE PRODUCCIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

No se consideran los balances de consumos e impactos generados durante el proceso de producción de los áridos reciclados en el proceso de cuantificar la sostenibilidad. Sin embargo, a continuación se presentan las características y el modo de producción de las dos plantas de reciclaje españolas que han suministrado los áridos utilizados en este trabajo.

El objetivo de esta presentación es la posibilidad de explicar alguna propiedad de los áridos reciclados causada por el método de producción.

La planta que ha suministrado el árido reciclado de hormigón es denominada en el trabajo como Planta de Reciclaje AH, mientras que la que ha suministrado el árido reciclado mixto es denominada Planta de Reciclaje AC. Ambas plantas poseen características similares y son representativas del mercado español de reciclaje de RCD.

### 4.2.1.1 Modo de producción de la Planta de Reciclaje AH

De acuerdo con la Planta de Reciclaje AH, el producto reciclado utilizado en este estudio es comercializado como:

- Nombre comercial: Gravilla 6-20
- Grupo: Árido grueso
- Naturaleza: Reciclado
- Fracción granulométrica: 6-20
- Procedencia: RCD de hormigón

Este árido no es el único material producido por la planta. Presenta, además, otros productos reciclados de composiciones y granulometrías distintas, resultantes de dos líneas de producción separadas (denominadas en la planta como línea de trituración y línea de clasificación, respectivamente).

El árido AH es un producto resultante de la línea de trituración de la planta (figura 4.5). Pasa por un proceso de trituración por molino de martillos, sin lavado, donde el tamaño de los áridos es determinado mediante el corte de una serie de cribas dispuestas bajo las tolvas que proceden la trituración y clasificación. Los sistemas de clasificación utilizados se limitan a la clasificación magnética y manual, por cabina de triaje.

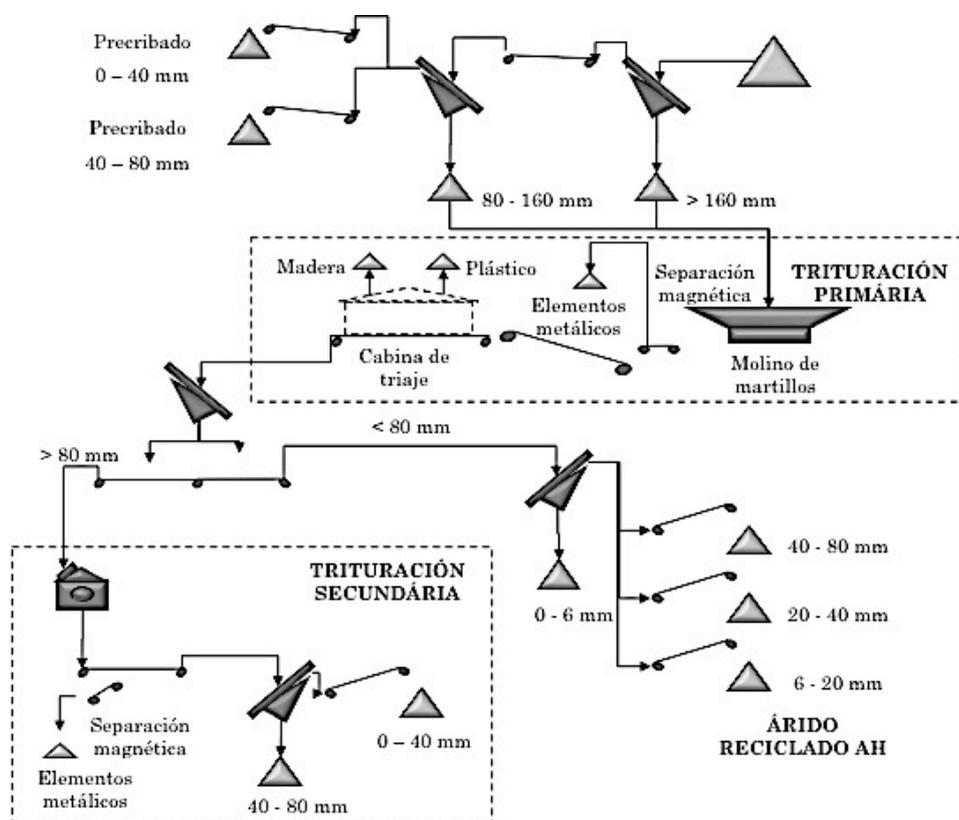


Figura 4.5. Línea de producción de la Planta de Reciclaje AH

Su producción es discontinua. El producto final es comercializado para uso en capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.

La materia prima para la producción del árido reciclado AH fue de residuos de construcción y demolición predominantemente compuestos por elementos de hormigón y mortero. También contiene elementos asfálticos. Clasificados previamente en origen, de acuerdo con la Planta de Reciclaje AH, estos RCDs han presentado un máximo de un 5% de impurezas.

#### **4.2.1.2 Modo de producción de la Planta de Reciclaje AC**

Según la Planta de Reciclaje AC, el producto reciclado utilizado en este estudio es comercializado como:

- Nombre comercial: AGT 0/32 R. MAMP.
- Grupo: Árido Todo Uno
- Naturaleza: Reciclado
- Fracción granulométrica: 0-32
- Procedencia: RCD de carácter mixto

Como en la Planta de Reciclaje AH, este árido no es el único material producido en la instalación. La planta produce, además, otros productos reciclados de composiciones y granulometrías distintas. El árido denominado AGT 0/32 R. MAMP es comercializado en la planta para uso en bases y sub bases de carreteras y explanadas.

La Planta de Reciclaje AC presenta una única línea de producción de áridos, que es utilizada para el tratamiento tanto de RCDs con predominancia de hormigón y mortero, como RCDs de carácter mixto.

El árido AC es un producto resultante de esta línea de producción (figura 4.6), que ha sido adaptada para generar el árido utilizado en este trabajo, en la fracción 6-20 mm, ya que este trabajo solo considera el uso de áridos reciclados gruesos, desconsiderando los finos.

La abertura de machaqueo del molino de impacto, inicialmente dispuesta para áridos hasta 32 mm, fue ajustada para generar un material con tamaño máximo de 20 mm. El tamaño mínimo de los áridos fue determinado mediante el corte con una criba adicional dispuesta bajo las tolvas que proceden la trituración secundaria.

El RCD que ha originado el árido reciclado AC ha pasado por un proceso de trituración primario, por machacadora de mandíbulas, y por un proceso de trituración secundario, por molino de martillos. Los sistemas de clasificación y limpieza utilizados han consistido en:

- dos separadores magnéticos ubicados, cada uno, en la salida de los trituradores;
- una cabina de triaje con posiciones que varían de 4 a 6 personas; y
- un soplador, ubicado en la salida de la cabina de triaje.



### 4.2.2.1 Granulometría

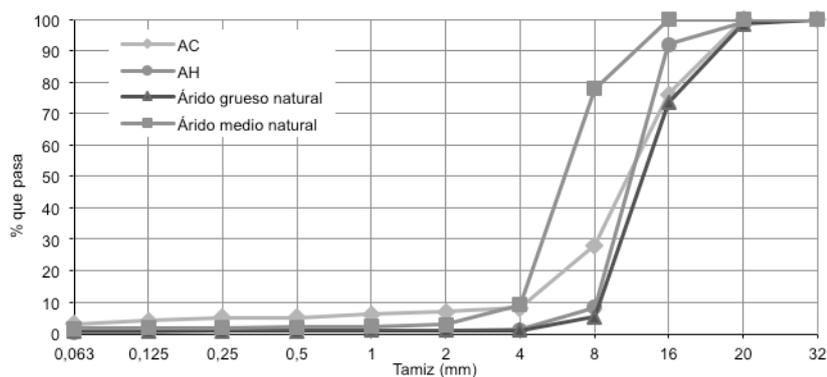
La granulometría del árido reciclado es una característica que depende del proceso de producción del material. Para la producción de los hormigones reciclados, se ha optado por el ajuste de la granulometría de los áridos reciclados a la granulometría del árido grueso convencional.

Así, las granulometrías de los áridos gruesos y medio utilizados en el estudio han sido determinadas para realizar el ajuste necesario. El procedimiento de ensayo sigue las especificaciones descritas en la norma EN 933-1:1998.

Las curvas granulométricas de todos los áridos están de acuerdo con las categorías indicadas por la norma UNE-EN 12620:2003 (Tabla 4.1 y Figura 4.7). Se nota una presencia de finos considerable en la muestra de árido AC analizada, por encima del límite del 1,5% establecido por la EHE (2008).

**Tabla 4.1. Granulometría de los áridos gruesos**

Tamiz	% que pasa			
	AC	AH	Árido grueso natural	Árido medio natural
0,063	3	0	1	2
0,125	4	1	1	2
0,25	5	1	1	2
0,5	5	1	1	2
1	6	1	1	2
2	7	1	1	3
4	8	1	1	9
8	28	8	5	78
16	76	92	73	100
20	100	99	99	100
32	100	100	100	100



**Figura 4.7. Curvas granulométricas de los áridos utilizados en el estudio**

Adicionalmente, una vez realizados los ajustes en la granulometría de los áridos reciclados, se ha realizado el análisis granulométrico de la mezcla de áridos gruesos y finos antes y después del proceso de mezcla en la hormigonera en seco. El objetivo ha sido identificar si el mezclado del

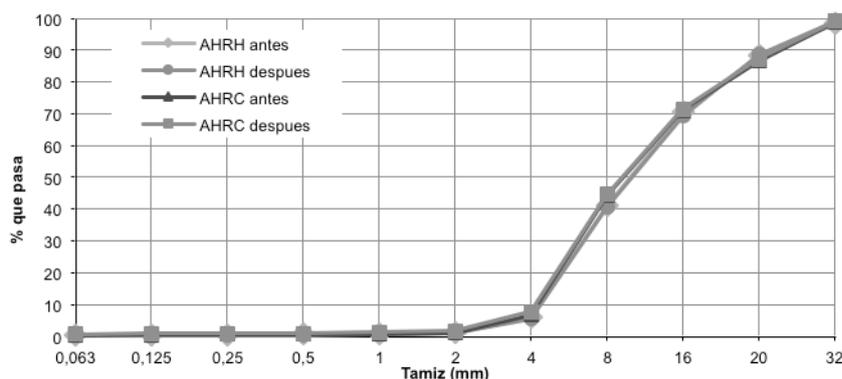
material influenciaría en el desprendimiento de partículas de mortero y cerámica y consecuente generación de finos.

En la tabla 4.2 se presentan las granulometrías de las mezclas de árido grueso y medio que se han empleado en los hormigones reciclados producidos en el estudio. La sigla AHRH se refiere a la mezcla de árido grueso y medio adoptada en la producción del hormigón con sustitución de 20% de árido convencional por árido reciclado AH, mientras la sigla AHRC se refiere a la mezcla de árido grueso y medio adoptada en la producción del hormigón con sustitución de 20% de árido convencional por árido reciclado AC.

**Tabla 4.2. Granulometría de las mezclas de áridos utilizadas en la producción de los hormigones**

Tamiz	% que pasa			
	AHRH antes	AHRH después	AHRC antes	AHRC después
0,063	0	0	1	1
0,125	1	0	1	1
0,25	1	1	1	1
0,5	1	1	1	1
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
4	6	6	7	8
8	41	41	44	45
16	71	69	71	71
20	88	89	87	87
32	99	99	99	99

Los resultados indican, en los dos casos, que el proceso de mezcla de los materiales en la hormigonera no tiene influencia relevante en la producción de finos durante la fabricación del hormigón (Figura 4.8).



**Figura 4.8. Curvas granulométricas de los áridos utilizados en el estudio antes y después del proceso de mezclado en hormigonera en seco**

#### 4.2.2.2 Densidad y Absorción

La tabla 4.3 presenta los resultados de densidad, absorción y porosidad obtenidos para todos los áridos utilizados en este trabajo. El procedimiento de ensayo sigue las especificaciones descritas en la norma UNE-EN 1097-6:2001.

Se observa que la densidad de los áridos reciclados utilizados en este trabajo es inferior a la del árido natural.

De acuerdo con la bibliografía, los áridos reciclados compuestos mayoritariamente de elementos de hormigón presentan una densidad que varía entre 2.100 y 2.400 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m<sup>3</sup> (Hansen y Narud, 1983; Hansen y col., 1992; Barra, 1996; Alaejos Gutiérrez y Sánchez de Juan, 2004; Etxeberria y col., 2004; Oliveira y col., 2004; Tanaka y col., 2004, González-Fontboa y Martínez-Abella, 2005).

**Tabla 4.3. Resultados de densidad y absorción de los áridos**

Parámetros	Unidad	AC	AH	Árido grueso natural	Árido medio natural	Árido fino natural
Densidad Aparente	kg/m <sup>3</sup>	2.498	2.612	2.694	2.702	2.720
Densidad Secado en Estufa	kg/m <sup>3</sup>	1.885	2.327	2.569	2.589	2.519
Densidad Saturado con Superficie Seca	kg/m <sup>3</sup>	2,13	2,44	2,62	2,63	2,59
Absorción	%	<b>13,01</b>	<b>4,68</b>	1,81	1,62	2,93
Porosidad	%	<b>24,53</b>	<b>10,89</b>	4,66	4,20	7,39

En el caso de áridos reciclados compuestos mayoritariamente por elementos cerámicos, los resultados de densidad identificados en la bibliografía suelen oscilar entre 1.866 y 2.225 kg/m<sup>3</sup>, mientras que para la densidad aparente se han encontrado valores entre 1.159 y 2.564 kg/m<sup>3</sup> (Akhtaruzzaman y Hasnat, 1983; Khaloo, 1994; Barra, 1996; Mansur y col., 1999; Brito y col., 2005; Senthamarai y Devadas Manoharan, 2005; Correia y col., 2006; Khalaf, 2006).

Los resultados encontrados tanto para el árido reciclado AH como para el árido reciclado AC son coherentes con los presentados en la bibliografía para áridos reciclados de composición similar. Se justifica los valores mas bajos de densidad de los áridos reciclados, debido a sus características físicas. El árido AH presenta menos densidad debido a la capa de mortero adherida a los granos, mientras que el árido AC presenta menos densidad debido tanto a la presencia de áridos reciclados de hormigón con mortero adherido como de elementos cerámicos.

Conforme indica la EHE (2008), los áridos reciclados AH pueden ser considerados de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2.000 kg/m<sup>3</sup>. Los áridos reciclados AC no pueden ser considerados de carácter ni ligero ni normal, pues los valores de densidad encontrados están en un intermedio entre los dos tipos de áridos citados.

En cuanto a la absorción y porosidad, el árido reciclado AH presenta valores muy por encima de los presentados por los áridos convencionales. Corroborando el valor de absorción encontrado, la

bibliografía (Alaejos Gutiérrez y Sánchez de Juan, 2004, González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2005) indica valores de absorción para áridos gruesos reciclados compuestos por elementos de hormigón entre 4-10%.

Los elevados valores de absorción y porosidad encontrados para el árido AH se deben a la capa adherida de mortero existente en los áridos reciclados de hormigón que lo componen.

Sánchez de Juan (2004), en especial, ha hecho una compilación de datos bibliográficos referentes a la absorción y los contenidos de mortero y pasta adheridos de áridos reciclados con el objetivo de establecer relaciones entre estos parámetros. La autora estima que los áridos reciclados de hormigón suelen presentar una absorción entre 0 y 4% para el árido natural, entre 16 y 17% para el mortero adherido del árido reciclado y entre 0,8 y 13% para el árido grueso reciclado como un todo. Con base en su estudio se observa que el aumento del contenido de mortero adherido supone un incremento de la absorción. Al hacer la comparación de los datos obtenidos con el límite de absorción del 5% recomendado por la EHE (2008) para áridos naturales, se verifica que el cumplimiento de este requisito solo ocurre en las partidas que presentan un contenido de mortero inferior a 38%.

Por otra parte, el árido reciclado AC presenta un valor de absorción muy elevado, siete veces superior al árido convencional y tres veces superior al árido reciclado AH. Esta muestra presenta, en consecuencia, el valor más alto de porosidad encontrado entre los áridos utilizados en este trabajo (24,53%).

El valor de absorción obtenido es algo superior a los encontrados por Akhtaruzzaman y Hasnat, 1983; Mansur y col., 1999 y Correia y col., 2006 (6-12%).

En este caso, la alta absorción y porosidad del árido reciclado AC se debe tanto a la porosidad de la matriz cerámica que origina los áridos reciclados cerámicos, como a la porosidad de la capa adherida de mortero existente en los áridos reciclados de hormigón, ambos tipos de áridos que están predominantemente presentes en el árido AC.

Los elementos cerámicos son los que más influyen el incremento de absorción y porosidad de este árido. Angulo (2005), en especial, evaluó la relación de la densidad de áridos mixtos (cerámicos y de hormigón) con la absorción de agua. Los resultados del estudio experimental, hecho por fases (piedra, cerámica y cemento), indican que los mayores valores de absorción están asociados a la fase cerámica del material.

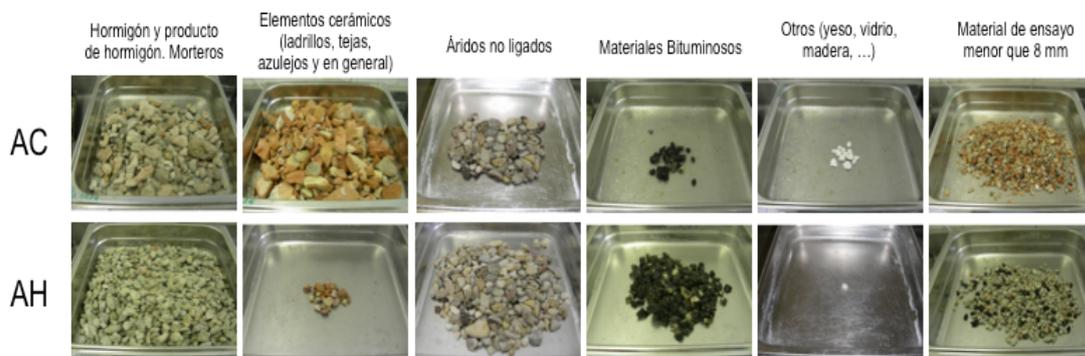
#### **4.2.2.3 Composición**

Un de los factores limitantes del uso de áridos reciclados en la producción de hormigones es la presencia de contaminantes en el residuo original. Las impurezas y contaminantes posibles en los áridos reciclados (plástico, madera, yeso, ladrillo, vidrio, materia orgánica, aluminio, etc.), producen en todos los casos un descenso de resistencia y durabilidad en el hormigón. Dependiendo

del tipo de impureza, se pueden presentar complicaciones como reacciones álcali-árido (vidrio), ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel), elevada retracción (tierras arcillosas) o mal comportamiento hielo-deshielo (algunos cerámicos).

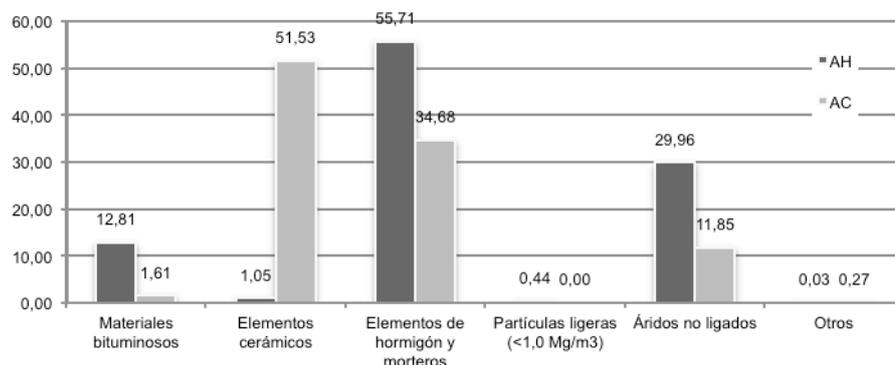
Actualmente la norma UNE-EN 933-11:2009 es la indicada para la determinación del contenido de impurezas de áridos reciclados. El procedimiento adoptado para el análisis de la composición de los áridos reciclados estudiados en este trabajo sigue las especificaciones descritas en el proyecto de la citada norma (prEN 933-11, 2004), ya que se trataba del documento disponible en la época de realización de la caracterización de esos materiales.

En la clasificación propuesta por el proyecto de la norma, se ha descartado las sub-categorías que comprenden la categoría B (Elementos de albañilería). En esta categoría, han sido considerados los materiales clasificados como ladrillos, tejas y azulejos. Se ha realizado registros fotográficos de los materiales clasificados, representados en la figura 4.9.



**Figura 4.9. Registros fotográficos de la composición de los áridos reciclados AC y AH**

Los áridos reciclados AH han presentando una cantidad importante de materiales bituminosos (12,81%), además de presentar 55,71% de áridos de hormigón y 29,96% de áridos no ligados (piedra). Los áridos reciclados AC han presentado 51,53% de elementos cerámicos (azulejos, tejas y ladrillos) y 46,53% de áridos de hormigón, mortero y áridos no ligados (figura 4.10).



**Figura 4.10. Composición de los áridos utilizados en el estudio**

Ninguno de los áridos reciclados utilizados en este trabajo están de acuerdo con las exigencias de composición de la EHE (2008): que limita al 5% el material cerámico, al 1% las partículas ligeras, al

1% las mezclas bituminosas y al 1% los otros materiales (vidrio, plásticos, metales, y otros). El árido reciclado AH presenta un gran contenido de elementos bituminosos mientras el árido reciclado AC presenta elevado contenido de elementos cerámicos.

Para este trabajo, la composición del árido dada por la EHE (2008) no es considerada una limitación. Se considera la clasificación presentada por el Proyecto GEAR (2010), que indica que ambos áridos utilizados en el trabajo tienen carácter mixto (Tabla 4.4). El árido AC se clasifica como árido reciclado mixto cerámico (ArM C) y el árido AH se clasifica como árido reciclado mixto con asfalto (ArM A).

Sobretodo, la propuesta de clasificación del Proyecto GEAR exige que la presencia máxima de otros elementos (suelo, arcilla, madera, vidrio, metales, plásticos, yeso y otros), sea de 1%, límite que es cumplido por ambos áridos reciclados analizados en este estudio.

**Tabla 4.4. Categorías de áridos reciclados propuesta por el Proyecto GEAR (2010)**

Categoría	Cantidad de elementos (% del peso total)				
	Ru (Productos pétreos)	Rc (Elementos de hormigón y mortero)	Rb (Elementos cerámicos)	Ra (asfalto)	X (Contenido de demás elementos)
Ar H	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ArM H	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%
ArM C	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ArM A	-		-	5%-30%	≤ 1%

#### 4.2.2.4 Resistencia al desgaste

En este punto de la etapa de caracterización, se ha analizado el desgaste por fragmentación de los áridos reciclados adoptados en el trabajo cuando éstos son sometidos a cargas abrasivas. Para eso, se ha determinado la resistencia por el método de ensayo de Los Ángeles, de acuerdo con la norma UNE EN 1097-2:1999.

El material utilizado consta de partículas duras y resistentes, libres de fragmentos blandos, alargados y exentos de material vegetal u otra sustancia perjudicial cualquiera.

Como resultado, se ha obtenido 33,87% de desgaste para el árido reciclado AH y 47,88% de desgaste para el árido reciclado AC.

Considerando las recomendaciones de la EHE (2008), los valores encontrados para los áridos reciclados utilizados en este trabajo no limitan el uso de esos materiales en hormigones. La instrucción EHE recomienda que:

- los áridos gruesos tengan una resistencia al desgaste inferior a 40%, valor cumplido por el árido AH;

- si existe experiencia previa en el empleo del árido y estudios experimentales específicos que avalen su utilización sin perjuicio de las prestaciones del hormigón, los áridos gruesos pueden presentar desgaste hasta 50%, valor que cumple el árido AC.

Es importante destacar que los valores encontrados para el árido reciclado de hormigón son coherentes con los encontrados en la bibliografía. Algunos autores (Hansen y Narud, 1983; Barra, 1996; González, 2002; Alaejos Gutiérrez y Sánchez de Juan, 2004, González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2005), indican valores de coeficiente de desgaste Los Ángeles para áridos reciclados compuestos en su mayoría por elementos de hormigón situados en el rango de 22 y 42%.

Hansen y Narud (1983), en especial, encontraron valores favorables en casi todas las muestras de árido ensayadas, incluso para las muestras con los mayores contenidos de mortero adherido. Al hacer la compilación de datos bibliográficos referentes a la relación entre el coeficiente Los Ángeles y los contenidos de mortero y pasta adheridos, sin embargo, se observa en general valores de coeficiente mayores si el contenido de pasta o mortero es mayor.

Trabajos experimentales desarrollados por Sánchez de Juan (2004) identifican resultados de coeficiente Los Ángeles en el rango de 35,1 y 41,9%. En este estudio se identifica que:

- la calidad del hormigón original influye en esta propiedad, ya que los áridos originados por hormigones de resistencia reducida presentaron valores más altos;
- los áridos que presentaron resultados de coeficiente Los Ángeles por debajo del 40% fueron los que presentaron absorción menor que 7% y densidad real mayor que 2,26 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 4.2.2.5 Análisis Químico – Contenido de cloruros

El procedimiento adoptado para la determinación del contenido de cloruros sigue las especificaciones descritas en la norma UNE EN 1744-1:1999. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Resultados del análisis químico de los áridos**

Muestra	Elemento sobre peso de muestra	
	Cloruros solubles en ácido (%)	Sulfatos solubles en ácido (%)
Árido Reciclado AH	0,01	0,33
Árido reciclado AC	0,05	0,92

Según ACHE (2006), los áridos reciclados compuestos por elementos de hormigón pueden presentar un contenido de cloruros respetable, a depender de la procedencia del hormigón usado como materia prima (hormigones procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo, o incluso hormigones con aditivos acelerantes).

Tanaka y col. (2004), por ejemplo, presentan altos valores de contenido de cloruros solubles en agua (0,195 kg/árido y 0,359 kg/árido, para áridos reciclados compuestos de elementos de hormigón gruesos y finos, respectivamente). Se debe tener en cuenta que, en este caso, el hormigón original fue hecho con arena del mar, debido a la escasez de áridos naturales en la región.

La bibliografía general indica, sin embargo, que cuando los hormigones no han estado expuestos a cloruros, los resultados tanto de los cloruros solubles en agua como de los cloruros totales suelen variar entre 0,03 y 0,29% (Sánchez de Juan, 2004).

Los valores encontrados tanto para el árido AH como para el árido AC son normales.

Los resultados cumplen las exigencias de la Instrucción EHE para hormigón armado. Para el contenido de cloruros solubles en agua del total de áridos utilizados en la mezcla (árido grueso y fino), la EHE (2008) establece un valor máximo de 0,05% para hormigón armado y de 0,03% para hormigón pretensado, límites superiores a los que suelen presentar el árido reciclado.

#### 4.2.2.6 Análisis Químico – Contenido de sulfatos

La determinación del contenido de sulfatos se ha realizado según la norma UNE EN 1744-1:1999. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.5.

Las recomendaciones sobre utilización de árido reciclado establecen el mismo límite que para el árido natural. Según RILEM (1994) y Collins (1998) el contenido de sulfatos solubles en ácido expresados en  $\text{SO}_3$  debe ser inferior a 1%.

La norma alemana DIN 4226-100 (2002) también establece un contenido de sulfatos máximo de 1% para áridos reciclados compuesto por elementos de hormigón, correspondiendo a 2,1% del contenido de yeso. Se debe resaltar que para áridos más ligeros, como es el caso del árido reciclado cerámico, la referida norma permite un mayor contenido de yeso en comparación al árido convencional debido al hecho de que este parámetro es calculado en relación al peso del árido.

Finalmente, la Instrucción EHE fija los límites de compuestos totales de azufre expresados en  $\text{SO}_3$  en 1%, y de sulfatos solubles en ácido expresados en  $\text{SO}_3$  en 0,8%, ambos para el total de áridos utilizados en la mezcla (árido grueso y fino).

Se observa que el valor de contenido de sulfatos encontrado para el árido AH es coherente con el identificado en la bibliografía, y cumple con las exigencias de la Instrucción EHE.

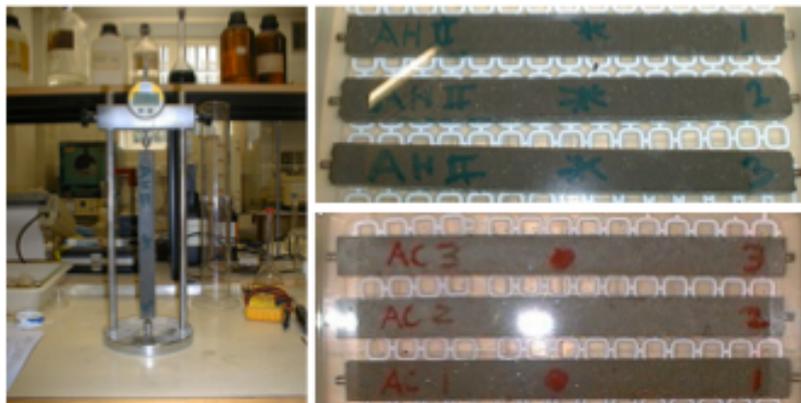
Por otra parte, el contenido de sulfatos del árido reciclado AC presenta un valor superior al 0,8% indicado por la EHE (2008). La presencia de sulfatos en el árido AC se debe al yeso y al sulfato procedente de las arcillas originales que provocan eflorescencia.

Sin embargo, debe considerarse que el valor límite indicado por la referida instrucción se refiere al total de áridos utilizados en la mezcla de hormigón (tanto el árido grueso y como el árido fino). Por lo tanto, el contenido de sulfatos presentado por el árido AC no constituye una limitación para el

uso de este material en hormigón, pues este valor solo representa la parcela referente al árido grueso utilizado en la mezcla.

#### 4.2.2.7 Reactividad Álcali-árido

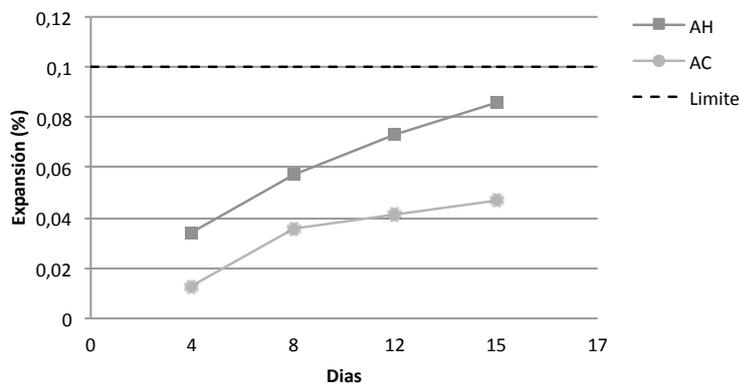
El procedimiento de ensayo sigue las especificaciones descritas en el método acelerado de probetas de mortero de la norma UNE-EN 146508:1998. La figura 4.11 presenta las probetas ensayadas sometidas a la solución alcalina.



**Figura 4.11. Probetas sometidas a la reacción álcali-árido**

De acuerdo con la EHE (2008), los áridos para uso en hormigón no deberán presentar reactividad potencial con los compuestos alcalinos del hormigón, ya sean procedentes del cemento o de otros componentes.

Como resultado del ensayo, tanto los áridos reciclados AH como los áridos reciclados AC no han presentado reactividad (figura 4.12).



**Figura 4.12. Reactividad potencial a los alcalinos de los áridos reciclados AH y AC**

### 4.3 PRODUCCIÓN DE LOS HORMIGONES RECICLADOS – MEZCLAS Y DOSIFICACIONES

Los hormigones analizados en este trabajo se dosificaron a partir de una mezcla de referencia ya consolidada para el uso en hormigones reciclados, y comúnmente utilizada en los estudios sobre el tema en la Sección de Materiales de Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La dosificación de referencia se ha definido para un hormigón convencional de resistencia de 25 N/mm<sup>2</sup> (0% de árido reciclado). Las mezclas recicladas correspondientes son compuestas por porcentajes de árido grueso reciclado de 20%, 50% y 100% (tanto para el árido reciclado AH como para el árido AC), en sustitución del árido grueso natural, según indicado en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Tipos de hormigones estudiados**

Nomenclatura del hormigón	% de sustitución de árido reciclado	Árido reciclado adoptado	Proporción de áridos
HO	0% (referencia)	-	100% CG
HRH 20%	20%	AH	80%CG + 20%AH
HRH 50%	50%		50%CG + 50%AH
HRH 100%	100%		0%CG + 100%AH
HRC 20%	20%	AC	80%CG + 20%AC
HRC 50%	50%		50%CG + 50%AC
HRC 100%	100%		0%CG + 100%AC

Nota: CG: árido grueso convencional

AH: árido grueso reciclado con predominancia de elementos de hormigón y mortero

AC: árido grueso reciclado con predominancia de elementos cerámicos

Considerando la gran diferencia de porosidad y absorción existente entre los áridos gruesos incorporados a los hormigones, todos los áridos utilizados en el trabajo han sido secados previamente en estufa. Se ha calculado el valor del agua de absorción para cada uno de los áridos gruesos y medios utilizados en cada amasada y la suma de esas cantidades ha sido incorporada a los áridos antes del procedimiento de mezcla total. La relación agua/cemento, por lo tanto, ha sido efectivamente mantenida en todas las mezclas realizadas.

En todas las mezclas, se ha utilizado un contenido de cemento de 275 kg/m<sup>3</sup>. La cantidad de aditivo ha sido ajustada para los distintos hormigones reciclados producidos, buscando la obtención de mezclas con consistencia blanda. El agua incorporada por el aditivo también se ha corregido del agua total.

La tabla 4.7 presenta las dosificaciones adoptadas para cada uno de los hormigones producidos en el trabajo. Las sustituciones de árido natural por árido reciclado se ha realizado en volumen.

**Tabla 4.7. Dosificaciones empleadas en la producción de los hormigones**

Elementos	Cantidad (kg/m <sup>3</sup> )	Hormigones producidos						
		HO	HRH 20%	HRH 50%	HRH 100%	HRC 20%	HRC 50%	HRC 100%
Cemento	kg/m <sup>3</sup>	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00	275,00
Agua	kg/m <sup>3</sup>	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75
Árido fino natural	kg/m <sup>3</sup>	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89	947,89
Árido grueso natural	kg/m <sup>3</sup>	512,57	312,82	13,20	0,00	312,82	13,20	0,00
Árido medio natural	kg/m <sup>3</sup>	489,95	489,95	489,95	0,00	489,95	489,95	0,00
Árido reciclado AH	kg/m <sup>3</sup>	0,00	181,09	452,74	905,47	0,00	0,00	0,00
Árido reciclado AC	kg/m <sup>3</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	146,90	367,24	734,48
Aditivo <sup>1</sup>	% cemento	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701
a/c efectiva	-	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65

<sup>1</sup> Cantidad de superplastificante inicialmente propuesta. Los valores han variado entre 0,7 y 2%, según caso, en función de la necesidad de alcanzarse una buena trabajabilidad de material.

En todas las mezclas producidas, el árido fino utilizado correspondió a un árido natural calizo de machaqueo. Los demás materiales utilizados en la producción de los hormigones fueron:

- **Cemento:** El cemento empleado en todos los hormigones producidos ha sido el cemento portland, tipo CEM I, de categoría resistente media alta de 42,5 R. De acuerdo con el fabricante, sus características lo hacen adecuado para su uso industrial en la elaboración de hormigones de alta resistencia, en masa, armado y pretensado. Sus propiedades permiten que el hormigón producido tenga resistencias medias-altas tanto para edades tempranas como a más largo plazo. No es un cemento indicado para la producción de hormigones expuestos a ambientes, aguas y terrenos agresivos.
- **Agua:** El agua utilizada para el amasado procedía del suministro habitual de Barcelona, que tiene como características el ser un agua correcta, con alta mineralización y dura.
- **Aditivo químico:** El aditivo químico utilizado en la fabricación de los hormigones fue un superplastificante reductor de agua usualmente comercializado para uso en hormigones prefabricados y para obra civil, en general. Clasificado como un aditivo tipo naftaleno sulfonato, este aditivo, de acuerdo con el fabricante, permite la producción de hormigones líquidos partiendo de consistencias secas sin la necesidad de adicionar más agua de amasado. No provoca retrasos de fraguado y ofrece elevadas resistencias tanto para edades tempranas como a más largo plazo. Puede proporcionar una reducción de agua de hasta 25%.

Al total han sido producidos cerca de 60 a 65 litros para cada tipo de hormigón, dividido en dos amasadas. El tipo y número de probetas empleadas para cada ensayo se presentan en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Especificación de probetas por ensayos

Parámetro	Tipo de Probeta	Cantidad por mezcla (unidad)
Resistencia a compresión	Cilíndrica 10 x 20 cm	3
Módulo de elasticidad	Cilíndrica 10 x 20 cm	3
Porosimetría de intrusión de mercurio		
Retracción por secado (UNE EN 1367-4:1999)	Prismática 7,5 x 7,5 x 25,4 cm	2
Retracción por secado (Método interno)	Prismática 7,5 x 7,5 x 25,4 cm	3
Densidad	Cilíndrica 10 x 20 cm	3
Absorción capilar		
Carbonatación	Prismática 10 x 10 x 40 cm	1
Penetración de cloruros (Pr UNE 83987:2007)	Cilíndrica 10 x 20 cm	3
Penetración de cloruros (AASHTO T 259:2002)	Cilíndrica 15 x 30 cm	1
Lixiviación	Cilíndrica 10 x 20 cm	3

Para la preparación de los áridos utilizados en la producción de los hormigones, se ha adoptado los siguientes procedimientos:

- Se ha secado previamente todos los áridos utilizados, para garantizar el control de agua empleada en los hormigones.
- Todos los materiales ha sido mantenidos en el laboratorio un mínimo de 24 horas antes de la fabricación a una temperatura entre 20-25°C.
- Se ha pesado por separado las distintas fracciones de árido utilizadas (figura 4.13a). Se ha empleado una balanza con error máximo del  $\pm 0,5\%$ . Para el cemento y el agua, se ha adoptado una balanza con un error máximo del  $\pm 0,2\%$ .

El procedimiento de amasado ha sido basado en la norma ASTM C 192/C 192M – 95 (2002). Para esa etapa se ha adoptado los siguientes procedimientos:

- Inicialmente el interior del tambor de la hormigonera ha sido humedecido y los áridos gruesos (árido grueso natural, árido medio natural y árido grueso reciclado, cuando aplicable) han sido añadidos (figura 4.13b) juntamente con una cantidad de agua del amasado equivalente a la cantidad del agua de absorción de los áridos empleados (figura 4.13c).
- Se ha dado dos vueltas a la hormigonera para extender los áridos (figura 4.12d), añadiendo después el árido fino y el cemento.
- A continuación, se ha puesto en marcha la hormigonera, iniciándose, en este momento, el tiempo de amasado. Con la hormigonera en marcha se ha añadido despacio el agua calculado en la dosificación dejando una pequeña cantidad para introducir mezclada con el aditivo (figura 4.13e).
- El amasado ha sido realizado en los siguientes tiempos: 3 minutos de amasado, 3 minutos de reposo y 2 minutos más de amasado.

- Los aditivos han sido incorporados disueltos en una pequeña parte del agua de amasado al iniciarse los 2 últimos minutos de amasado (figura 4.13f). Se ha adoptado la cantidad que permitió obtener hormigones con buena trabajabilidad.
- Durante el periodo de reposo y tras los 2 últimos minutos de amasado se han realizado las medidas de la temperatura del hormigón y del ambiente (figura 4.13g).
- Inmediatamente después de los últimos 2 minutos de amasado se ha hecho la medida de la consistencia, por el cono de Abrams, de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-2:2006 (figura 4.13h).



**Figura 4.13. Registros fotográficos del procedimiento de fabricación de los hormigones analizados en este estudio**

Para el llenado de las probetas, compactación y conservación, se ha adoptado el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 12390-2:2001. Para esa etapa los siguientes procedimientos han sido realizados:

- La compactación ha sido efectuada inmediatamente después del vertido del hormigón en el molde, de modo que se ha obtenido una compactación completa sin una excesiva segregación, ni aparición de flujo de lechada en exceso (figura 4.14a).
- Las probetas han sido compactadas en un número mínimo de dos capas, con un espesor superior a 100 mm (figura 4.14b).
- Las probetas han sido mantenidas en los moldes cubiertas por una arpillera húmeda, de forma que la temperatura estuviera comprendida entre 16°C y 27°C. La arpillera ha sido mantenida húmeda hasta la extracción de las probetas de los moldes (figura 4.14c).
- Transcurridas las 24 horas, las probetas han sido transportadas a la cámara húmeda, donde han sido almacenadas hasta la edad de 28 días para la realización de los ensayos previstos en el plan experimental (figura 4.14d).



**Figura 4.14. Registros fotográficos del procedimiento de llenado, compactación y conservación de los hormigones analizados en este estudio**

#### 4.4 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

La escasez de estudios de determinados parámetros de esos materiales, aliada al propio carácter heterogéneo de los áridos reciclados producidos en España, indica que el análisis de la sostenibilidad de esos hormigones debe ser corroborada por ensayos de laboratorio específicos. Análisis simplificados solo deberán ser realizados una vez que el conocimiento respecto a esos materiales esté consolidado.

Con el objetivo de obtener todos los datos de los áridos y hormigones reciclados necesarios al estudio de sostenibilidad propuesto en este trabajo, se ha realizado la campaña experimental indicada en la tabla 4.9.

**Tabla 4.9. Campaña de ensayos propuesta**

Grupo de ensayos	Parámetro de análisis	Norma adoptada
Propiedades mecánicas y físicas	Densidad, absorción y porosidad	UNE EN 12390-7:2001
	Resistencia a compresión	UNE EN 83304:1984
	Módulo de elasticidad	UNE EN 83316:1996
	Retracción por secado	UNE 83318:1994
		Método Interno del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción
Porosimetría de intrusión de mercurio	ASTM D4404:1984	
Durabilidad	Absorción Capilar	prUNE 83982:2007
	Carbonatación	RILEM CPC-18 (1988)
	Penetración de cloruros	prUNE 83987:2007
		AASHTO T 259:2002
Impacto ambiental por lixiviación	Lixiviación – material granular	UNE- EN 12457-4:2003
	Lixiviación – material monolítico	NEN 7345:1995

Todos los ensayos han sido realizados de acuerdo con normativas europeas o procedimientos ya consolidados en el área de investigación de materiales secundarios y, en su mayoría, por triplicado. La edad de ensayo propuesta fue de 28 días.

## 4.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En primer lugar, es importante destacar que los áridos reciclados escogidos para este trabajo, tanto el árido reciclado AH como el árido reciclados AC, representan áridos reciclados de carácter mixto. Mientras el árido reciclado AH presenta una cantidad relevante de elementos bituminosos (cerca de 13%), el árido reciclado AC presenta una cantidad de cerca de 52% de elementos cerámicos. El uso de estos áridos ha generado una gran representatividad al trabajo, ya que, de acuerdo con datos facilitados por el Proyecto GEAR:

- Cerca de 37,5% de las plantas de reciclaje españolas productoras de árido reciclado de hormigón y diagnosticadas por el proyecto producen áridos con contenidos relevantes de elementos bituminosos (por encima del 5%).
- Cerca de 80% de las plantas de reciclaje españolas diagnosticadas por el proyecto producen árido reciclados con contenidos relevantes de elementos cerámicos (por encima del 10%).

El hecho que los áridos reciclados utilizados en este trabajo no presenten cantidades de cloruros superiores a los límites presentados por la EHE es un aspecto bastante favorable a la durabilidad de estos en hormigón. La existencia relevante de cloruros en el mortero adherido que compone tanto los áridos reciclados AH como los áridos reciclados AC podría contribuir para que el hormigón iniciará más rápidamente el proceso de corrosión. Por eso, la importancia en limitar el contenido inicial de Cl<sup>-</sup> en el hormigón endurecido, además de acciones de prevenciones de las variables que afectan su ingreso.

El contenido de sulfatos existente en estos áridos tampoco ha representado una limitación para el uso de esos materiales en hormigón. Aunque el árido reciclado AC haya presentado un contenido de sulfatos superior al enseñado en la bibliografía (0,92%), este valor solo representa la parcela referente al árido grueso utilizado en la mezcla. El valor encontrado no es considerado lo suficientemente alto para influenciar el valor total de los áridos utilizados en la mezcla (tanto el árido grueso y como el árido fino), y, en consecuencia, contribuir para que el valor conjunto supere el límite indicado por la normativa española.

De acuerdo con el Proyecto GEAR (2010), los valores más altos de sulfatos solubles en agua corresponden a áridos compuestos por un alto contenido de elementos cerámicos y que no han pasado por un sistema de limpieza por agua, características igualmente presentadas por el árido AC.

Añadido al contenido propio del árido natural, probablemente existen sulfatos en la pasta adherida de los árido reciclados de hormigón que lo componen, en las arcillas originales de los áridos reciclados cerámicos y en los contaminantes pasibles de existencia como el yeso, ya que el residuo que lo origina procede de edificación.

Se debe tener en cuenta que, a través del proceso de producción del árido, se puede evitar la presencia de impurezas como el yeso y sulfatos. Según el Proyecto GEAR (2010), una forma es el uso de sistemas de limpieza por agua.

Finalmente, se percibe la importancia de la absorción y porosidad. Estas características de los áridos son muy importantes para la sostenibilidad de un hormigón. Cuanto más poroso sea el hormigón, mejor serán las condiciones de penetración de agentes agresivos a la estructura y de lixiviación de contaminantes. No obstante, aún que la porosidad del árido pueda influenciar en la porosidad del hormigón, este no es un factor que debe ser considerado determinante para su durabilidad y lixiviación:

- En el caso de la durabilidad, análisis específicos de absorción capilar, penetración de cloruros y carbonatación son necesarios para verificar y cuantificar estas acciones de degradación.
- En el caso de la lixiviación, una posible mayor porosidad del hormigón puede contribuir para que el elemento sea más permeable y, en consecuencia, que el transporte de contaminantes en su interior sea más fácil. Sin embargo, lo que determina el impacto ambiental por lixiviación de un hormigón es la existencia de concentraciones relevantes de contaminantes en el elemento. La realización de un estudio específico de lixiviación es considerado fundamental para evaluar el impacto ambiental de hormigones reciclados.