

Índice general

Resumen	III
Índice general	XIII
Lista de figuras	XXI
Lista de tablas	XXXVII
1 Introducción	1
1.1 Aspectos generales.	1
1.2 Estructura de la tesis.	5
2 Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivo Específico.	9
3 Estado del arte.	11
3.1 Contexto histórico.	11
3.2 Contexto medio ambiental.	12
3.2.1 Industria del cemento.	13
3.2.2 Residuos de construcción y demolición (<i>RCD</i>).	17
3.3 Activación alcalina.	25

3.4 Activadores alcalinos.	31
3.4.1 Efecto del tipo de ión alcalino	32
3.4.2 Efecto del contenido de silicatos solubles.	32
3.5 Materia prima	33
3.6 Condiciones de curado	33
3.7 Durabilidad	34
3.8 Aplicaciones	35
3.9 Emisiones de los conglomerantes activados alcalinamente.. . . .	37
3.10 Investigaciones previas sobre la activación alcalina de residuos de demolición.. . . .	38
4 Metodología experimental.	41
4.1 Materiales.	41
4.1.1 Cemento Portland (<i>OPC</i>)	41
4.1.2 Cemento de aluminato cálcico (<i>CAC</i>).	42
4.1.3 Escoria de alto horno (<i>S</i>).	43
4.1.4 Ceniza volante (<i>FA</i>).	45
4.1.5 Yeso (<i>G</i>).	45
4.1.6 Kephallite Andaluca.	46
4.1.7 Filler calizo.. . . .	46
4.1.8 Residuos de construcción y demolición (<i>RCD</i>).	47
4.1.9 Áridos.. . . .	48
4.1.10 Agua de amasado.	48
4.1.11 Agua desionizada.	49
4.1.12 Hidróxido de calcio.	49
4.1.13 Hidróxido de sodio.. . . .	49
4.1.14 Silicato sódico.	49
4.1.15 Otros.	50
4.2 Equipos y métodos de ensayo.	50
4.2.1 Trituración y molienda del material.	50
4.2.2 Análisis de partículas por difracción de rayos láser (<i>ADL</i>).. . . .	51
4.2.3 Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	53
4.2.4 Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	53
4.2.5 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	55
4.2.6 Conductividad eléctrica y pH en suspensión acuosa.	56
4.2.7 Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	57
4.2.8 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	57

4.2.9 Preparación de muestras para los microanálisis.	58
4.2.10 Pérdida por calcinación.	60
4.2.11 Determinación de carbonatos mediante el calcímetro de Bernard.	61
4.2.12 Determinación de la dureza total.	62
4.2.13 Determinación del residuo insoluble (<i>R.I.</i>).	63
4.2.14 Preparación de morteros.	64
4.2.15 Trabajabilidad.	67
4.2.16 Resistencia mecánica.	68
4.2.17 Determinación de la expansión mediante reloj comparador.	69
4.3 Programa experimental.	70
I CHC Magallanes	73
5 Obtención y caracterización del cemento hidratado y carbonatado.	75
5.1 Obtención del material de partida.	75
5.1.1 Carbonatación en seco.	78
5.1.2 Carbonatación en húmedo.	84
5.2 Caracterización física y química del <i>CHC</i>	88
5.2.1 Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	88
5.2.2 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	88
5.2.3 Análisis de distribución de partículas por difracción láser (<i>ADL</i>).	89
5.2.4 Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	91
5.2.5 Evaluación del proceso de carbonatación.	92
5.3 Estudio de la reactividad puzolánica del <i>CHC Seco</i>	93
5.3.1 Medida de pH y conductividad en suspensión acuosa cal/ <i>CHC Seco</i>	94
5.3.2 Temperatura de ensayo: 40 °C.	95
5.3.3 Temperatura de ensayo: 60 °C.	98
5.3.4 Análisis termogravimétrico en pastas de cal.	100
5.4 Pastas de <i>CHC Seco</i> activadas alcalinamente.	102
5.4.1 Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	104
5.4.2 Avance del proceso de geopolimerización.	115
5.4.3 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	118
5.4.4 Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	120
5.4.5 Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	125
5.5 Conclusiones.	130

6	Sistemas combinados.	133
6.1	<i>CHC Magallanes</i> - Yeso.	133
6.1.1	Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	135
6.1.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	141
6.1.3	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	143
6.1.4	Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	146
6.2	Sustitución <i>CHC Magallanes</i> - Escoria de alto horno.	148
6.2.1	Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	149
6.2.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	157
6.2.3	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	160
6.2.4	Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	162
6.3	Sustitución <i>CHC Magallanes</i> - <i>CAC</i>	168
6.3.1	Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	171
6.3.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	175
6.3.3	Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	176
6.4	Sustitución <i>CHC Magallanes</i> - Otros.	178
6.4.1	Filler Calizo.	178
6.4.2	Andalucita.	180
6.4.3	<i>CHC Magallanes</i>	181
6.4.4	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	183
6.4.5	Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	185
6.5	Conclusiones.	187
II	Otros materiales	189
7	Obtención y caracterización de <i>Mag3</i> .	191
7.1	Obtención del material de partida.	191
7.1.1	Carbonatación en húmedo.	192
7.2	Caracterización física y química del <i>Mag3</i>	195
7.2.1	Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	195
7.2.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	196
7.2.3	Análisis de distribución de partículas por difracción láser (<i>ADL</i>).	197
7.2.4	Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	197
7.3	Estudio de la reactividad puzolánica del <i>Mag3</i>	199
7.3.1	Temperatura de ensayo: 40 °C.	199

7.3.2 Temperatura de ensayo: 60 °C.	201
7.4 Pastas de <i>Mag3</i> activadas alcalinamente.	203
7.4.1 Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	204
7.4.2 Avance del proceso de geopolimerización.	205
7.4.3 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	207
7.4.4 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	208
7.4.5 Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	210
7.5 Conclusiones.	212
8 Obtención y caracterización de <i>Mag4</i>.	215
8.1 Obtención del material de partida.	215
8.1.1 Carbonatación en húmedo.	216
8.2 Caracterización física y química del <i>Mag4</i>	220
8.2.1 Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	220
8.2.2 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	221
8.2.3 Análisis de distribución de partículas por difracción láser (<i>ADL</i>).	221
8.2.4 Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	222
8.3 Medida de pH y conductividad eléctrica en suspensión acuosa <i>cal/Mag4</i>	224
8.3.1 Temperatura de ensayo: 40 °C.	225
8.3.2 Temperatura de ensayo: 60 °C.	227
8.4 Pastas de <i>Mag4</i> activadas alcalinamente.	229
8.4.1 Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	229
8.4.2 Avance del proceso de geopolimerización.	231
8.4.3 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	233
8.4.4 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	234
8.4.5 Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	237
8.5 Conclusiones.	239
9 Obtención y caracterización de <i>CAC Atacama</i>.	241
9.1 Obtención del material de partida.	241
9.1.1 Carbonatación en húmedo.	241
9.2 Caracterización físico y químico del <i>CAC Atacama</i>	246
9.2.1 Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	246
9.2.2 Análisis de distribución de partículas por difracción láser (<i>ADL</i>).	246
9.2.3 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	247

9.2.4	Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>)	249
9.3	Estudio de la reactividad puzolánica del CAC Atacama.	251
9.3.1	Medida de pH y conductividad en suspensión acuosa cal/ <i>CAC Atacama</i> , a una temperatura de ensayo de 60 °C.	251
9.3.2	Análisis termogravimétrico en pastas de cal.	255
9.4	Pastas de <i>CAC Atacama</i> activadas alcalinamente.	256
9.4.1	Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	257
9.4.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	259
9.4.3	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	261
9.4.4	Fabricación de morteros. Medidas de resistencia mecánica.	262
9.5	Conclusión.	264
III Residuos de construcción y demolición.		267
10 Caracterización RCD provenientes de plantas de reciclado.		269
10.1	Caracterización físico-químico del RCD.	270
10.1.1	Composición física del RCD.	270
10.1.2	Fluorescencia de rayos X (<i>FRX</i>).	271
10.1.3	Granulometría.	272
10.1.4	Análisis granulométrico por difracción láser (<i>ADL</i>).	272
10.1.5	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	273
10.1.6	Análisis termogravimétrico del <i>RCD</i>	274
10.1.7	Caracterización por microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	276
10.1.8	Conductividad eléctrica y pH.	277
10.2	Resistencias mecánicas.	280
10.2.1	Morteros de <i>OPC</i> con sustitución de <i>RCD</i>	280
10.2.2	Morteros de <i>RCD</i> activados alcalinamente.	282
10.2.3	Morteros de <i>RCD</i> y escoria de alto horno activados alcalinamente.	287
10.2.4	Ganancia de resistencia de los morteros de <i>RCD</i> -escoria activados alcalinamente.	296
10.3	Análisis de pastas de activación alcalina del <i>RCD</i> y de sistemas <i>RCD</i> -escoria.	299
10.3.1	Análisis termogravimétrico (<i>TGA</i>).	299
10.3.2	Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	301
10.3.3	Microscopía electrónica de barrido (<i>SEM</i>).	301
10.4	Conclusiones.	303

11 Huella de carbono para los nuevos materiales.	305
11.1 Huella de carbono.	305
11.2 Captura CO_2 fijado en la materia prima.	314
11.2.1 Metodología general de cálculo.	314
11.2.2 <i>CHC Magallanes</i> .	315
11.2.3 <i>Proceso de carbonatación Mag3</i> .	323
11.2.4 <i>Proceso de carbonatación Mag4</i> .	331
11.2.5 <i>Proceso de carbonatación CAC Atacama</i> .	340
11.2.6 <i>Comentarios generales</i> .	348
11.3 Dióxido de carbono (CO_2) emitido en el proceso de geopolimerización de los morteros.	350
11.4 Conclusiones.	361
12 Durabilidad de los sistemas conglomerantes en base de <i>CHC Magallanes</i> .	363
12.1 Estudio del ataque externo de sulfatos sobre los distintos conglomerantes.	364
12.1.1 Procedimiento experimental.	364
12.1.2 Análisis del proceso de expansión.	365
12.1.3 Difracción de rayos X (<i>DRX</i>).	367
12.1.4 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (<i>FESEM</i>).	370
12.2 Degradación por ciclo de hielo/deshielo.	373
12.2.1 Procedimiento experimental.	376
12.3 Conclusiones.	380
13 Conclusiones y consideraciones finales.	381
13.1 Conclusiones finales.	381
13.2 Propuestas para futuras líneas de investigación.	383