

ÍNDICE

CAPÍTULO I_INTRODUCCIÓN	1
1 Aspectos generales	1
2 Referencias bibliográficas	3
CAPÍTULO II_REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1 Contexto medioambiental	5
1.1 La industria del cemento	6
1.1.1 Medidas para minizar el impacto ambiental	7
2 La activación alcalina	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Síntesis de los geopolímeros	12
2.3 Activadores alcalinos	17
2.3.1 Activadores alcalinos alternativos	20
2.3.1.1 La ceniza de cáscara de arroz (CCA)	21
2.4 Materia prima	24
2.4.1 El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)	25
2.5 Condiciones de curado	27
2.6 Durabilidad de los conglomerantes activados alcalinamente	27
2.7 Aplicaciones de los conglomerantes activados alcalinamente	28
3 Referencias bibliográficas	29
CAPÍTULO III_OBJETIVOS	47
1 Objetivo general	47
2 Obejtivos específicos	49
CAPÍTULO IV_METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	51
1 Materiales	51
1.1 La ceniza de cáscara de arroz (CCA)	51
1.2 Sikron	51
1.3 Hidróxido de sodio (NaOH)	53
1.4 Hidróxido de potasio (KOH)	53
1.5 Silicato de sodio (Na_2SiO_3) y silicato de potasio (K_2SiO_3)	54

Activadores alcalinos alternativos a partir de la ceniza de cáscara de arroz,
para la fabricación de geopolímeros

1.6 Agua	54
1.7 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)	54
1.8 Ladrillo	55
1.9 Escoria	55
1.10 Cemento Portland (CP)	55
1.11 Cemento hidratado carbonatado (CHC)	55
1.12 Áridos	57
1.13 Filler calizo	58
1.14 Otros reactivos químicos	58
2 Equipos y procedimientos experimentales	58
2.1 Procedimientos para los análisis químicos realizados	58
2.1.1 Determinación del residuo insoluble HCl de la ceniza de cáscara de arroz	59
2.1.2 Determinación de la sílice total en la ceniza de cáscara de arroz	59
2.1.3 Determinación del contenido en sílice amorfa o reactiva de la ceniza de cáscara de arroz	60
2.1.4 Determinación de la pérdida al fuego de la ceniza de cáscara de arroz	61
2.2 Molienda	62
2.3 Análisis de partículas por difracción de rayos láser (ADL)	64
2.4 Fluorescencia de rayos X (FRX)	65
2.5 Difracción de rayos X (DRX)	67
2.6 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)	68
2.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	69
2.8 Análisis termogravimétrico (TG)	72
2.9 Conductividad eléctrica y pH	75
2.10 Preparación de la disolución activadora	76
2.11 Preparación de morteros	78
2.12 Preparación de hormigones	80
2.13 Medidas de trabajabilidad	87
2.14 Medidas de resistencia mecánica	88
3 Referencias bibliográficas	92
CAPÍTULO V_RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
1 Caracterización físico-química	97
1.1 La ceniza de cáscara de arroz (CCA)	97



1.1.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)	98
1.1.2 Residuo insoluble en ácido clorhídrico	99
1.1.3 Contenido de sílice amorfa y cristalina	100
1.1.4 Difracción de rayos X (DRX)	101
1.1.5 Análisis térmico (TG)	102
1.1.6 Análisis de distribución de partículas por difracción láser (ADL)	103
1.1.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	105
1.1.8 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	106
1.2 El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)	107
1.2.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)	107
1.2.2 Difracción de rayos X (DRX)	108
1.2.3 Análisis térmico (TG)	109
1.2.4 Análisis de distribución de partículas por difracción láser (ADL)	109
1.2.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	110
1.2.6 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	111
1.3 Caracterización de otros materiales usados como precursores para la fabricación de geopolímeros	112
1.3.1 Ladrillo	112
1.3.2 Escoria	116
1.3.3 Cemento hidratado carbonatado (CHC)	119
1.4 Conclusiones	122
1.5 Referencias bibliográficas	123
2 Preparación del activador alcalino	127
2.1 Tratamientos de la ceniza de cáscara de arroz	131
2.1.1 Reflujo	132
2.1.2 Baño termostático	134
2.1.3 Reacción a presión en estufa	134
2.1.4 Baño a 65°C	135
2.1.5 Tratamiento a temperatura ambiente	135
2.1.6 Microondas	136
2.1.7 Reacción en recipiente termostatizado	137
2.2 Cálculo de la sílice disuelta	138
2.2.1 Reflujo	140
2.2.2 Baño termostático	144

Activadores alcalinos alternativos a partir de la ceniza de cáscara de arroz,
para la fabricación de geopolímeros

2.2.3 Reacción a presión en estufa	145
2.2.4 Baño a 65°C	147
2.2.5 Tratamiento a temperatura ambiente	149
2.2.6 Microondas	151
2.3 Influencia de la relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ en la cantidad de sílice disuelta	153
2.3.1 Influencia del contenido de ceniza de cáscara de arroz	154
2.3.2 Influencia de la concentración de hidróxido de sodio	155
2.4 Conclusiones	157
2.5 Referencias bibliográficas	158
3 Conglomerantes activados alcalinamente utilizando como precursor el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC). Resistencia mecánica de morteros	163
3.1 Elaboración y preparación de morteros de activación alcalina	164
3.2 Influencia de los tratamientos térmicos aplicados a la ceniza de cáscara de arroz	169
3.2.1 Reflujo	169
3.2.2 Reacción a presión en estufa	171
3.2.3 Baño a 65°C	174
3.2.4 Tratamiento a temperatura ambiente	176
3.2.5 Reacción en recipiente termostatzado	178
3.3 Influencia de la relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ en la resistencia mecánica	180
3.3.1 Reflujo durante 60 minutos: R60	181
3.3.1.1 Influencia del contenido de ceniza de cáscara de arroz	182
3.3.1.2 Influencia de la concentración de NaOH	184
3.3.2 Tratamiento a temperatura ambiente	187
3.4 Influencia de las condiciones de curado en la resistencia mecánica de morteros de activación alcalina	190
3.4.1 Reflujo durante 60 minutos: R60	191
3.4.1.1 Curado en cámara húmeda	191
3.4.1.2 Curado en baño térmico a 65°C	192
3.4.2 Reacción en recipiente termostatzado: T24h	194
3.4.2.1 Curado en cámara húmeda	194
3.4.2.2 Curado en baño térmico a 65°C	196



3.4.3 Comparación R60-T24h	197
3.4.3.1 Curado en cámara húmeda	198
3.4.3.2 Curado en baño térmico a 65°C	199
3.4.4 Disolución en baño térmico a 65°C durante 24 horas: 65°C-24h	201
3.4.5 Disolución a temperatura ambiente durante 28 días: T.Amb-28d	202
3.4.6 Comparación de resistencias entre los cuatro tratamientos estudiados	204
3.5 Conclusiones	206
3.6 Referencias bibliográficas	207
4 Conglomerantes activados alcalinamente utilizando como precursor el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC). Estudio en pastas	211
4.1 Proceso de elaboración de las pastas. Condiciones y tiempos de curado	212
4.2 Medidas de pH y conductividad eléctrica	214
4.2.1 Curado de las pastas en cámara húmeda	214
4.2.2 Curado de las pastas en baño térmico a 65°C	217
4.3 Análisis termogravimétrico (TG)	219
4.3.1 Curado en cámara húmeda	220
4.3.2 Curado en baño térmico a 65°C	222
4.4 Difracción de rayos X (DRX)	223
4.4.1 Curado en cámara húmeda	226
4.4.2 Curado en baño térmico a 65°C	227
4.5 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	231
4.5.1 Curado en cámara húmeda	234
4.5.2 Curado en baño térmico a 65°C	235
4.6 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	237
4.6.1 Curado en cámara húmeda	237
4.6.2 Curado en baño térmico a 65°C	239
4.7 Efecto de otros tratamientos de la ceniza de cáscara de arroz en la microestructura de los conglomerantes activados alcalinamente	242
4.7.1 Medidas de pH y conductividad eléctrica	243
4.7.2 Análisis termogravimétrico (TG)	246
4.7.3 Difracción de rayos X (DRX)	248
4.7.4 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	249
4.7.5 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	250
4.8 Conclusiones	251

Activadores alcalinos alternativos a partir de la ceniza de cáscara de arroz,
para la fabricación de geopolímeros

4.9 Referencias bibliográficas	252
5 Influencia del hidróxido de potasio en el activador alcalino	257
5.1 Propiedades microestructurales	259
5.1.1 Análisis termogravimétrico (TG)	259
5.1.1.1 Curado en cámara húmeda	261
5.1.1.2 Curado en baño térmico a 65°C	263
5.1.2 Difracción de rayos X (DRX)	264
5.1.2.1 Curado en cámara húmeda	266
5.1.2.2 Curado en baño térmico a 65°C	268
5.1.3 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)	271
5.1.3.1 Curado en cámara húmeda	272
5.1.3.2 Curado en baño térmico a 65°C	273
5.1.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	274
5.1.4.1 Curado en cámara húmeda	274
5.1.4.2 Curado en baño térmico a 65°C	276
5.2 Propiedades mecánicas	278
5.2.1 Curado en cámara húmeda	278
5.2.2 Curado en baño térmico a 65°C	282
5.2.3 Influencia de la concentración de KOH en el activador alcalino	286
5.2.4 Influencia de otros tratamientos térmicos para la formación del activador alcalino	290
5.3 Conclusiones	293
5.4 Referencias bibliográficas	293
6 Conglomerantes activados alcalinamente a partir de otros precursores	297
6.1 Propiedades microestructurales	299
6.1.1 Análisis termogravimétrico (TG)	299
6.1.1.1 Curado en cámara húmeda	300
6.1.1.2 Curado en baño térmico a 65°C	306
6.1.2 Difracción de rayos X (DRX)	310
6.1.3 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	315
6.1.3.1 Curado en cámara húmeda	315
6.1.3.2 Curado en baño térmico a 65°C	319
6.1.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	321
6.1.4.1 Curado en cámara húmeda	322



6.1.4.2 Curado en baño térmico a 65°C	326
6.2 Propiedades mecánicas	329
6.3 Conclusiones	334
6.4 Referencias bibliográficas	335
7 Hormigones geopoliméricos	341
7.1 Dosificación del hormigón	341
7.1.1 Relación grava/arena	342
7.1.2 Relación árido/conglomerante	342
7.1.3 Preparación del activador alcalino	342
7.1.4 Cálculos	344
7.2 Elaboración de probetas cúbicas	346
7.2.1 Influencia de la relación árido/conglomerante en la resistencia mecánica del hormigón	346
7.2.2 Influencia de la adición de filler en la reología y resistencia mecánica del hormigón	348
7.3 Elaboración de bloques autónomos	350
7.3.1 Resistencia a compresión de los bloques	352
7.4 Coste económico	354
7.5 Conclusiones	358
7.6 Referencias bibliográficas	360
CAPÍTULO VI _CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	361
1 Conclusiones finales	361
2 Propuestas para futuras líneas de investigación	363
ANEXO I	365
ANEXO II	369
ANEXO III	377
ANEXO IV	381

Activadores alcalinos alternativos a partir de la ceniza de cáscara de arroz,
para la fabricación de geopolímeros
