

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Aspectos generales	1
1.2 Relevancia del tema	2
1.3 Estructura de la Tesis	7
1.4 Referencias bibliográficas	3
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Contexto histórico	11
2.2 Hidratación del cemento	12
2.3 Cementos alcalinos o geopoliméricos	16
2.4 La materia prima: las puzolanas.....	20
2.4.1. Catalizador de craqueo catalítico	21
2.4.2. Silicoaluminato de calcio vítreo	22
2.5 Aditivos químicos comerciales	24
2.6 Método de espectroscopía de impedancia eléctrica. Origen y aplicaciones recientes en el campo de la construcción.	26
2.6.1. Origen: La impedancia y otras funciones de inmitancia	28
2.6.2. La EIE aplicada al campo de la construcción.....	30
2.6.3. Tipos de impedancia eléctrica. Circuito eléctrico equivalente.....	33
2.7 Bibliografía.....	36
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	48
3.1 Objetivo general.....	48
3.2 Objetivos específicos.....	48
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	50
4.1 Materiales	50
4.1.1. Cemento Portland.....	50
4.1.2. Catalizador de craqueo catalítico	51
4.1.3. Silicoaluminato de calcio vítreo	53
4.1.4. Ceniza de cáscara de arroz.....	53



4.1.5. Hidróxido de Sodio	55
4.1.6. Silicato de Sodio	55
4.1.7. Agua	55
4.1.8. Arenas y gravas.....	56
4.1.9. Aditivos superplastificantes	56
4.1.10. Otros reactivos químicos	56
4.1.11. Morteros y hormigones estudiados	57
4.2 Equipos y procedimiento experimental.....	60
4.2.1. Caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM)	60
4.2.2. Granulometría por difracción láser (ADL).....	61
4.2.3. Difracción de rayos X (DRX)	62
4.2.4. Fluorescencia de rayos X (RFX)	64
4.2.5. Porosimetría de intrusión de mercurio.....	65
4.2.6. Análisis termogravimétrico (TGA).....	67
4.2.7. Preparación de la solución activadora	71
4.2.8. Amasado y curado de morteros prismáticos	72
4.2.9. Amasado y curado de morteros y hormigones cilíndricos.....	74
4.2.10. Equipos de ensayo de resistencia mecánica de morteros.....	76
4.2.11. Equipos de ensayo de resistencia mecánica de morteros y hormigones cilíndricos	77
4.3 Método de espectroscopía de impedancia eléctrica	78
4.3.1. Obtención de los datos de morteros prismáticos	78
4.3.2. Obtención de los datos de morteros y hormigones cilíndricos.....	80
4.3.3. Calibración y corrección de los datos	81
4.3.3.1. Probetas prismáticas	81
4.3.3.2. Probetas cilíndricas	84
4.3.4. Tratamiento y análisis de los datos	84
4.3.4.1. Análisis de la parte real (RE) e imaginaria (Im) de la conductividad. Análisis por frecuencias.....	85



4.3.4.2. Análisis de $R_p(f)$ de la impedancia representada como un circuito de dos ramas en paralelo $R_p/C_p(f)$ Cálculo de R_{cp}	86
4.3.4.3. Análisis diferencial de la impedancia (DIA)	86
4.3.4.4. Análisis de las relajaciones con la búsqueda del circuito eléctrico equivalente.....	87
4.4 Modelos de hidratación	91
4.5 Bibliografía	94
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
5.1 Morteros. Probetas prismáticas	98
5.1.1. Morteros de Cemento Portland (OPC)	98
5.1.1.1. Análisis de la conductividad eléctrica por frecuencias	100
5.1.1.1.1. Análisis de la conductividad real en función de la frecuencia y el tiempo de curado	100
5.1.1.1.2. Análisis de la conductividad imaginaria en función de la frecuencia y el tiempo de curado	102
5.1.1.2. Análisis de $R_p(f)$ de la impedancia representada como $R_p(f)/C_p(f)$	105
5.1.1.3. Análisis DIA	109
5.1.1.4. Análisis del CEE	111
5.1.1.4.1. Relajaciones en la impedancia.....	111
5.1.1.4.2. Análisis de las resistencias de CEE	119
5.1.1.5. Ciclos de secado-saturado de las muestras	122
5.1.1.6. Análisis de las propiedades mecánicas	129
5.1.1.7. Modelos de hidratación	131
5.1.1.8. Análisis de la microestructura.....	137
5.1.1.9. Estudio de la microscopía (SEM)	142
5.1.1.10. Conclusiones parciales.....	146
5.1.2. Morteros de Catalizador de craqueo catalítico (FCC)	150
5.1.2.1. Análisis de la conductividad eléctrica por frecuencias	151
5.1.2.1.1. Análisis de la conductividad real en función de la frecuencia y el tiempo de curado	151



5.1.2.1.2. Análisis de la conductividad imaginaria en función de la frecuencia y el tiempo de curado	154
5.1.2.2. Análisis de $R_p(f)$ de la impedancia representada como $R_p(f)/C_p(f)$	157
5.1.2.3. Análisis DIA	161
5.1.2.4. Análisis del CEE	163
5.1.1.4.1. Relajaciones en la impedancia.....	165
5.1.1.4.2. Análisis de las resistencias de CEE	166
5.1.2.5. Ciclos de secado-saturado de las muestras	168
5.1.2.6. Análisis de las propiedades mecánicas	175
5.1.2.7. Modelos de hidratación	177
5.1.2.8. Análisis de la microestructura.....	183
5.1.2.9. Estudio de la microscopía (SEM)	187
5.1.2.10. Porosimetría de mercurio	188
5.1.2.11 Conclusiones parciales.....	191
5.1.2. Morteros de Silicoaluminato de calcio vítreo (VCAS).....	196
5.1.3.1. Análisis de la conductividad eléctrica por frecuencias	197
5.1.3.1.1. Análisis de la conductividad real en función de la frecuencia y el tiempo de curado	197
5.1.3.1.2. Análisis de la conductividad imaginaria en función de la frecuencia y el tiempo de curado	199
5.1.3.2. Análisis de $R_p(f)$ de la impedancia representada como $R_p(f)/C_p(f)$	200
5.1.3.3. Análisis DIA	203
5.1.3.4. Análisis del CEE	204
5.1.1.3.1. Relajaciones en la impedancia.....	204
5.1.1.3.2. Análisis de las resistencias de CEE	208
5.1.3.5. Análisis de las propiedades mecánicas	209
5.1.3.6. Modelos de hidratación	211
5.1.3.7. Análisis de la microestructura.....	215
5.1.3.8. Estudio de la microscopía (SEM)	217
5.1.3.9. Porosimetría de mercurio	218



5.1.3.10 Conclusiones parciales.....	211
5.2 Morteros y hormigones. Probetas cilíndricas	223
5.2.1. Morteros de Cemento Portland (OPC)	223
5.2.1.1. Análisis de la conductividad eléctrica por frecuencias	223
5.2.1.1.1. Análisis de la conductividad real en función de la frecuencia y el tiempo de curado	225
5.2.1.1.2. Análisis de la conductividad imaginaria en función de la frecuencia y el tiempo de curado	227
5.2.1.2. Análisis de $R_p(f)$ de la impedancia representada como $R_p(f)/C_p(f)$	232
5.2.1.3. Análisis DIA	
5.2.1.4. Análisis del CEE	237
5.2.1.4.1. Relajaciones en la impedancia.....	239
5.2.1.4.2. Análisis de las resistencias de CEE	242
5.2.1.5. Análisis de las propiedades mecánicas	243
5.2.1.6. Modelos de hidratación	248
5.2.1.7. Porosimetría de mercurio	250
5.2.1.8 Conclusiones parciales.....	252
5.4 Bibliografía.....	254
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y DISPOSICIONES FINALES	255
6.1 Conclusiones generales	255
6.2 Disposiciones finales: futuras líneas de investigación	256